

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VITOR LORIVAL KUDLANVEC JUNIOR

**ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REPARO EM SUBSTRATO DE CONCRETO
COM ÊNFASE NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO**

CURITIBA

2017

VITOR LORIVAL KUDLANVEC JUNIOR

**ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REPARO EM SUBSTRATO DE CONCRETO
COM ÊNFASE NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

CURITIBA

2017

K95a

Kudlanvec Junior, Vitor Lorival

Aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto com ênfase no comportamento reológico / Vitor Lorival Kudlanvec Junior. – Curitiba, 2017.

179 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2017.

Orientador: Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa .

Bibliografia: p. 158-165.

1. Argamassa. 2. Cimento. 3. Concreto armado. 4. Engenharia de estruturas. 5. Reologia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Costa, Marienne do Rocio de Mello Maron da. III. Título.

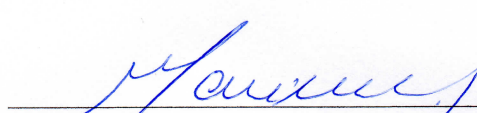
CDD: 691.5

TERMO DE APROVAÇÃO

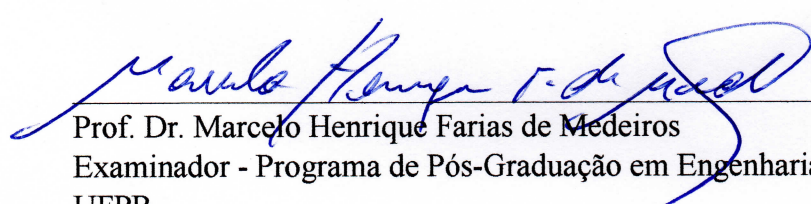
VITOR LORIVAL KUDLANVEC JUNIOR

ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REPARO EM SUBSTRATO DE CONCRETO COM ÊNFASE NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof.ª Dr.ª Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa
Orientadora - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR



Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Examinador - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR



Prof.ª Dr.ª Eliane Betânia Carvalho Costa
Examinadora – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Curitiba, 21 de junho de 2017

Dedico este trabalho à Engenharia: arte que une ciência e técnica com incomparável maestria.
Que este estudo seja de bom proveito a ambos.

AGRADECIMENTOS

Como não poderia deixar de ser, agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Vitor e Wanda, pela criação, formação e bons exemplos que me colocaram no bom caminho. Também agradeço a todos os meus familiares que estiveram presentes e acreditaram neste trabalho.

Agradeço à professora Marienne pela orientação e apoio durante todo o processo de desenvolvimento deste estudo, e, além disso, pela confiança depositada desde o processo seletivo. Também agradeço ao aluno Gabriel Rieke pelo auxílio em várias etapas da pesquisa.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil que de alguma forma ajudaram no desenvolvimento deste trabalho. Em especial agradeço aos professores José Marques Filho e Marcelo Henrique Farias de Medeiros pelas disciplinas ministradas, pelo conhecimento passado formal e informalmente e pelas críticas e sugestões apresentadas no exame de qualificação, que enriqueceram e melhoraram este estudo. Agradeço também à “dona” Ziza pelo ótimo trabalho na secretaria do programa.

Agradeço ao engenheiro, professor, colega e amigo Rui Medeiros pela minha iniciação profissional na Engenharia de Estruturas, principalmente por despertar meu interesse na área de patologias e recuperação de estruturas.

Agradeço aos colegas de Programa que estiveram comigo no cumprimento dos créditos, dividindo os laboratórios e que serão levados para sempre comigo. Em especial, agradeço à Thaísa Mariana Rocha pelo companheirismo em vários trabalhos e ao Eiji Fukui pelos materiais, ensaios e experiência compartilhados que foram de muita valia.

Agradeço ao Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de Construção Civil da UFPR pela cessão do espaço físico, materiais e equipamentos para realização dos ensaios. Aos técnicos de laboratório Douglas Mancini e Ricardo Volert pelo inestimável trabalho frente aos laboratórios e pelo compartilhamento de conhecimento sobre a execução de ensaios. Também ao Laboratório de Óptica de Raios X da UFPR, ao professor Irineu Mazzaro e do técnico Daniel da Silva Costa. Ao Laboratório de Minerais e Rochas da UFPR e aos técnicos Ivan Arthur Bindo e Marcelo Adriano Maceno e à analista Franciele Czervinski. Também ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR, ao professor Ney Mattoso Filho e aos técnicos Deonir Agustini e Vera Regina Fontana Pionteke.

***“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo,
participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade. ”***

Marie Skłodowska Curie
(1867-1934)

KUDLANVEC JUNIOR, V. L. **Aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto com ênfase no comportamento reológico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

RESUMO

Estruturas de concreto armado quando submetidas às intempéries do meio ambiente ficam sujeitas ao surgimento de manifestações patológicas durante sua vida útil. Em países desenvolvidos, como os Estados Unidos da América, o orçamento destinado pela indústria da construção civil para reparos estruturais chega a 21 bilhões de dólares por ano. No Brasil, não há estimativas concretas a respeito do investimento em reparo estrutural. O desempenho do sistema de reparo dessas estruturas é influenciado pelo substrato do concreto devidamente preparado para esta intervenção, pela argamassa de reparo, que é a matriz que substitui o concreto danificado e pela zona de transição que separa a matriz e o substrato. O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência de aderência das argamassas de reparo com o substrato de concreto levando em consideração a influência das características reológicas da argamassa de reparo em estado fresco. Os elementos que caracterizam as argamassas de reparo como sua composição física e química têm importância fundamental no comportamento em estado fresco de argamassas e, também, no desempenho em estado endurecido, como resistência mecânica, módulo de elasticidade, variação dimensional linear e resistência de aderência com o substrato. Foram estudadas cinco (5) argamassas industrializadas e comercializadas no mercado da construção civil de Curitiba/PR, além de três (3) argamassas dosadas em laboratório – uma referência, uma com adição de 10% de polímero EVA e uma com 10% de adição de sílica ativa – com a finalidade de estudar o efeito destes materiais isoladamente. O programa experimental foi dividido em cinco (5) partes: caracterização físico-química das argamassas industrializadas; caracterização reológica através de ensaios de *squeeze-flow* e outros ensaios auxiliares; ensaios de desempenho mecânico das argamassas; ensaios de resistência de aderência com o substrato; e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para análise da zona de transição de cada sistema de reparo. Concluiu-se que as características reológicas de argamassas no estado fresco influenciam no desempenho de aderência com o substrato, sendo que argamassas menos viscosas obtêm melhor resistência de aderência, supostamente por proporcionarem maior extensão de aderência pelo substrato. Dentre as argamassas industrializadas, a granulometria foi o principal fator que influenciou no comportamento reológico entre as amostras. Com relação às argamassas de reparo dosadas em laboratório, a adição de polímero EVA se mostrou mais eficaz na melhoria do comportamento reológico do que a sílica ativa com o mesmo traço em massa.

Palavras-chave: argamassas de reparo, aderência, comportamento reológico de argamassas, reparo estrutural.

KUDLANVEC JUNIOR, V. L. **Adherence of repair mortars on concrete substrate with emphasis on rheological behavior**. Master's thesis (Master's degree on Civil Engineering). Federal University of Parana, Curitiba, 2017.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures, when submitted to the environment are allowed to the appearance of pathological manifestations during their useful life. In developed countries, such as the United States of America, the budget earmarked by the construction industry for structural repairs amounts to US\$ 21 billion per year. In Brazil, there are no concrete estimates regarding investment in structural repair. The repair system of these structures is comprised of the concrete substrate duly prepared for this intervention, by the repair mortar, which is the matrix that replaces the damaged concrete and the transition zone that separates the matrix and the substrate. This work deals with the evaluation of the adhesion strength of repair mortars with the concrete substrate taking into account the influence of the rheological characteristics of the repair mortar in the fresh state. The objective of this work is to study the elements that characterize repair mortars as their physical and chemical composition, which are of fundamental importance in the fresh state mortar behavior, and thus to characterize the performance of the mortars in the hardened state, as resistance Mechanics, modulus of elasticity, linear dimensional variation and adhesion resistance with the substrate. Five (5) commercially manufactured mortars were commercialized in the Curitiba / PR civil construction market, in addition to three (3) mortars dosed in the laboratory - a reference, one with addition of 10% EVA polymer and one with 10% addition of active silica - in order to study the effect of these materials alone. The experimental program was divided into five (5) parts: physical-chemical characterization of industrialized mortars; Rheological characterization by squeeze-flow and other auxiliary assays; Compatibility tests with the substrate, where the mechanical performance of the mortars was verified; Adhesion resistance tests with the substrate; And scanning electron microscopy (SEM) for analysis of the transition zone of each repair system. It was concluded that the rheological properties of mortars in the fresh state influence the adhesion performance with the substrate, whereas less viscous mortars obtain better adhesion resistance, supposedly because they provide a greater extension of the substrate. Among the industrialized mortars, the granulometry was the main factor that influenced the rheological behavior among the samples. With regard to dosed mortars, the addition of EVA polymer proved more effective in improving rheological behavior than active silica with the same mass trait.

Keywords: repair mortars, adhesion, mortar rheological behavior, structural repair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Técnica de reparo mal executada em viga de concreto armado.	21
Figura 2 - Lei da evolução de custos de Sitter.	25
Figura 3 – Representação esquemática do conteúdo da EN 1504.....	28
Figura 4 – Etapas de um trabalho de recuperação estrutural previstas na EN 1504-9	28
Figura 5 – Modelo de um sistema de reparo em estrutura de concreto	29
Figura 6 - Procedimento de operação de reparo localizado em uma estrutura de concreto.	30
Figura 7 – Etapas para execução de reparo estrutural em concreto.	30
Figura 8 - Representação da composição de uma argamassa de reparo.....	32
Figura 9 - Consistência típica de argamassas de reparo.....	32
Figura 10 - Fatores que compreendem a compatibilidade de um sistema de reparo.....	34
Figura 11 - Tipos de falha no reparo localizado em estruturas de concreto.....	34
Figura 12 - Efeito da adição de polímero em mistura de argamassa nos estados fresco e endurecido.	37
Figura 13 - Formação do filme polimérico em material cimentício, do início da mistura até a coalescência.....	38
Figura 14 - Estrutura química de formação do EVA.....	39
Figura 15 - Microestrutura de argamassas modificadas com diferentes tipos de polímero em comparação à argamassa não modificada.....	40
Figura 16 - Atuação de partículas finas em materiais cimentícios.	42
Figura 17 - Ruptura de elementos estruturais de concreto sob ação de carregamento axial (a) por fendilhamento; (b) por cisalhamento oblíquo; (c) mista entre as situações (a) e (b); (d) por flexão (momento fletor de pórtico, flambagem ou excentricidade de carga e (e) por flambagem das armaduras longitudinais.....	43
Figura 18 - Representação dos mecanismos de aderência químicos e mecânicos entre adesivo e substrato.	44
Figura 19 - Defeito interfacial no contato entre reparo e substrato de concreto.	45
Figura 20 - Efeito da adição de cal na extensão de aderência de argamassa de revestimento	46
Figura 21 - Efeito da saturação do substrato na hidratação da matriz.....	47
Figura 22 - Diagramas reológicos de fluidos.	48
Figura 23 - Efeito do tempo e história do cisalhamento na viscosidade do fluido.....	49
Figura 24 - Modelo esquemático do ensaio de squeeze-flow.....	49
Figura 25 - Curva teórica de ensaio de squeeze-flow.	50
Figura 26 - Método gráfico de determinação da tensão de escoamento de fluido através de ensaio de squeeze-flow.	52
Figura 27 - Fluxograma das fases do programa experimental.	54

Figura 28 - Apresentação visual das argamassas industrializadas: (a) AI-1 (b) AI-2 (c) AI-3 (d) AI-4 (e) AI-5	55
Figura 29 - Curva granulométrica da areia das argamassas dosadas em laboratório.	57
Figura 30 - Curva granulométrica da areia do substrato de concreto.	59
Figura 31 - Técnicas aplicadas para caracterização física das argamassas industrializadas	61
Figura 32 - DRX de argamassa de reparo	63
Figura 33 - Equipamento utilizado na difração de raios X.....	63
Figura 34 - Painel de carbeto de tungstênio para moagem do material.....	64
Figura 35 - Moinho de eixo vertical.....	64
Figura 36 - Pastilha prensada para análise de fluorescência de raios X.....	65
Figura 37 - Equipamento utilizado na análise de fluorescência de raios X.....	65
Figura 38 - Equipamento utilizado para ensaio de granulometria a laser.	67
Figura 39 - Equipamento para determinação da massa unitária das argamassas.	68
Figura 40 - Técnicas aplicadas para caracterização reológica das argamassas estudadas.....	69
Figura 41 - Corpo de prova para ensaio de comportamento reológico por squeeze-flow.....	70
Figura 42 - Equipamentos para moldagem do corpo de prova para ensaio de squeeze-flow.....	70
Figura 43 - Sequência de montagem de corpo de prova para ensaio de squeeze-flow	71
Figura 44 - Corpo de prova para squeeze-flow sendo posicionado na prensa.	72
Figura 45 - Mesa de consistência e molde tronco-cônico para ensaio de determinação do índice de consistência de argamassas.	74
Figura 46 - Configuração para ensaio de resistência à tração na flexão.	76
Figura 47 – Corpo de prova posicionado para ensaio de resistência à tração na flexão	77
Figura 48 - Aparelho de medição da velocidade das ondas ultrassônicas.....	79
Figura 49 - Equipamento para medição de variação dimensional linear.....	80
Figura 50 - Montagem dos corpos de prova para ensaio de resistência à tração direta.....	82
Figura 51 – Placa de substrato para ensaio de resistência de aderência à tração direta	82
Figura 52 - Equipamento pull-off tester utilizado no ensaio de resistência de aderência à tração direta.	83
Figura 53 - Pull-off tester acoplado à pastilha do corpo de prova.....	84
Figura 54 - Formas de ruptura no ensaio de resistência à tração direta.	85
Figura 55 - Montagem do corpo de prova para ensaio de resistência de aderência à tração na flexão.	85
Figura 56 - Substrato para ensaio de tração na flexão.....	86
Figura 57 - Procedimento de saturação da superfície de contato do substrato.....	86
Figura 58 – Corpo de prova posicionado para ensaio de aderência à tração na flexão	87
Figura 59 - Corpo de prova posicionado para ensaio de aderência ao cisalhamento direto.....	89
Figura 60 – Montagem do corpo de prova para ensaio de cisalhamento oblíquo	90
Figura 61 - Substratos moldados para ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo. ...	91

Figura 62 – Corpo de prova para avaliação da aderência ao cisalhamento oblíquo posicionado na prensa.	92
Figura 63 - Serra diamantada para retificação de amostra.	93
Figura 64 - Processo de retificação de amostra para microscopia.	94
Figura 65 - Amostras de argamassas retificadas para análise.	94
Figura 66 - Amostras fixadas no porta amostras e prontas para a metalização.	95
Figura 67 - Amostra metalizada.	95
Figura 68 - Microscópio eletrônico de varredura com detector para EDS acoplado.	96
Figura 69 - Difrátogramas de raios X das argamassas industrializadas	99
Figura 70 - Curvas granulométricas contínuas de porcentagem retida das argamassas industrializadas (fração grossa).	101
Figura 71 - Curvas granulométricas contínuas de porcentagem passante das argamassas industrializadas (fração grossa).	101
Figura 72 - Distribuição granulométrica discreta das argamassas industrializadas	102
Figura 73 – Curvas de distribuição granulométrica comparativa entre amostras.	102
Figura 74 - Curvas granulométricas completas das argamassas industrializadas.	104
Figura 75 - Estimativa das frações constituintes das argamassas industrializadas baseadas nas análises químicas e granulometria	107
Figura 76 – Densidade e teor de ar aprisionado das argamassas industrializadas em estado fresco...	108
Figura 77 – Densidade e teor de ar aprisionado das argamassas dosadas em laboratório em estado fresco.	109
Figura 78 - Rendimento de utilização das argamassas.	110
Figura 79 - Correlação entre o rendimento e o teor de ar aprisionado.	110
Figura 80 - Curvas do ensaio de squeeze-flow realizado imediatamente ao final da mistura em velocidade de 0,1 mm/s	111
Figura 81 - Curvas do ensaio de squeeze-flow realizado imediatamente ao final da mistura em velocidade de 1,0 mm/s.	111
Figura 82 - Curvas do ensaio de squeeze-flow realizado imediatamente ao final da mistura em velocidade de 3,0 mm/s.	112
Figura 83 - Curvas do ensaio de squeeze-flow realizado 20 minutos após a mistura em velocidade de 0,1 mm/s	112
Figura 84 - Curvas do ensaio de squeeze-flow realizado 20 minutos após a mistura em velocidade de 1,0 mm/s	113
Figura 85 - Curvas do ensaio de squeeze-flow realizado 20 minutos após a mistura em velocidade de 3,0 mm/s	113
Figura 86 – Curvas de viscosidade aparente das argamassas estudadas para tempo zero.	115
Figura 87 - Curvas de tensão de cisalhamento das argamassas estudadas para tempo zero.	116

Figura 88 - Curvas de tensão de cisalhamento das argamassas AI-1, AI-2 e AD-EVA.	117
Figura 89 - Viscosidade das argamassas estudadas ao tempo zero.	117
Figura 90 - Curvas de viscosidade aparente das argamassas estudadas para um tempo de 20 minutos após a mistura.....	118
Figura 91 - Curvas de tensão de cisalhamento das argamassas estudadas para um tempo de 20 minutos após a mistura.....	118
Figura 92 - Viscosidade das argamassas estudadas a um tempo de 20 minutos após a mistura.	119
Figura 93 - Correlação entre tensão de escoamento e tensão de cisalhamento para amostras ensaiadas imediatamente após a mistura separadas por taxa de deformação.	122
Figura 94 - Correlação entre teor de ar aprisionado e tensão de escoamento.	123
Figura 95 - Argamassa AI-3 ao fim do ensaio de flow-table	124
Figura 96 - Aparência característica das argamassas após ensaio de flow-table.....	124
Figura 97 - Correlação entre índice de consistência e viscosidade.	125
Figura 98 - Correlação entre índice de consistência e viscosidade para cada tipo de amostra.	126
Figura 99 - Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas industrializadas com a idade.	127
Figura 100 - Evolução da resistência à compressão das argamassas industrializadas com a idade.	127
Figura 101 - Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas dosadas em laboratório com a idade.	128
Figura 102 - Evolução da resistência à compressão das argamassas dosadas em laboratório com a idade.	129
Figura 103 - Relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão	130
Figura 104 - Evolução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas industrializadas com a idade.	131
Figura 105 - Evolução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas dosadas em laboratório com a idade.	132
Figura 106 - Evolução da variação dimensional das argamassas industrializadas.....	133
Figura 107 - Evolução da variação dimensional das argamassas dosadas em laboratório.....	133
Figura 108 - Variação dimensional final das argamassas industrializadas aos 28 dias.	134
Figura 109 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas industrializadas com idade de 1 e 2 dias.	138
Figura 110 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas industrializadas com idade de 7 dias.	138
Figura 111 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas industrializadas com idade de 28 dias.	139
Figura 112 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas dosadas com idade de 1 e 2 dias.....	139

Figura 113 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas dosadas com idade de 7 dias.	140
Figura 114 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas dosadas com idade de 28 dias.	140
Figura 115 - Ruptura de corpo de prova da argamassa AI-2 à tração na flexão aos 28 dias.....	141
Figura 116 - Ruptura de corpo de prova da argamassa AI-3 à tração na flexão aos 28 dias.....	142
Figura 117 - Ruptura de corpos de prova ao cisalhamento direto no substrato	142
Figura 118 - Ruptura de corpos de prova ao cisalhamento direto na zona de transição	143
Figura 119 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência à tração direta das argamassas estudadas	144
Figura 120 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência à tração direta das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.	145
Figura 121 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência à tração na flexão das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.	146
Figura 122 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência ao cisalhamento direto das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.	147
Figura 123 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.	147
Figura 124 - Imagens capturadas por MEV da interface de ligação do sistema de reparo aumentadas 25 mil vezes.....	149
Figura 125 - Imagens capturadas por MEV da interface de ligação do sistema de reparo aumentadas em 1.000 vezes.	150

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Grupos de causas de deterioração de estruturas.	20
Quadro 2 – Partes da série normativa EN 1504:2005	27
Quadro 3 - Requisitos gerais de argamassas de reparo para compatibilidade estrutural no estado endurecido.....	35
Quadro 4 - Classificação de desempenho de diferentes tipos de argamassa de reparo frente a diversos ensaios.....	36
Quadro 5 – Identificação das argamassas industrializadas utilizadas no estudo.....	56
Quadro 6 - Características das argamassas dosadas em laboratório.....	56
Quadro 7 - Relação de ensaios e laboratórios participantes do programa experimental.....	60
Quadro 8 - Análise fracionada de argamassas.....	61
Quadro 9 - Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.....	66
Quadro 10 - Unidades de análise para caracterização reológica das argamassas de reparo.....	69
Quadro 11 - Tempos de mistura e trabalhabilidade das argamassas industrializadas	72
Quadro 12 - Relação de corpos de prova para ensaios de estado endurecido.	75
Quadro 13 - Relação de corpos de prova para ensaios de resistência de aderência	81
Quadro 14 - Principais elementos presentes nas argamassas industrializadas identificadas pelo ensaio de DRX.	98
Quadro 15 – Quantidade de cimento estimadas para as argamassas industrializadas.....	106
Quadro 16 - Índice de consistência das argamassas ao ensaio de flow-table.....	123
Quadro 17 - Aplicabilidade das argamassas industrializadas na construção civil.	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custo médio de diferentes tipos de argamassas comercializadas no Paraná em janeiro de 2017.	22
Tabela 2 - Ensaios de caracterização do cimento CPV-ARI das argamassas de laboratório.	57
Tabela 3 - Ensaios de caracterização do cimento CII-F 32 do substrato.	59
Tabela 4 - Teores de óxido e perda ao fogo obtidos a partir de ensaio de FRX.	97
Tabela 5 - Resultados de massa unitária, massa específica e índice de vazios das argamassas estudadas	100
Tabela 6 - Teor solúvel e insolúvel das amostras anidras de argamassas de reparo industrializadas.	105
Tabela 7 - Estimativa do teor de fíler na composição das argamassas industrializadas.	105
Tabela 8 - Variação na viscosidade das argamassas estudadas após tempo de repouso de mistura de 20 minutos.	119
Tabela 9 – Tensão de escoamento das argamassas em ensaio imediatamente após a mistura (tempo zero).	121
Tabela 10 – Tensão de escoamento das argamassas em ensaio 20 minutos após a mistura (tempo=20).	121
Tabela 11 - Comparação de resistência mecânica das argamassas industrializadas entre o resultado ensaiado e o publicado em catálogo de produto.	130
Tabela 12 - Resistências de aderência das argamassas industrializadas para os diferentes ensaios com idades de 1 dia e 2 dias (para tração direta).	135
Tabela 13 - Resistências de aderência das argamassas industrializadas para os diferentes ensaios com idade de 7 dias.	135
Tabela 14 - Resistências de aderência das argamassas industrializadas para os diferentes ensaios com idade de 28 dias.	136
Tabela 15 - Resistências de aderência das argamassas dosadas para os diferentes ensaios com idades de 1 dia e 2 dias (para tração direta).	136
Tabela 16 - Resistências de aderência das argamassas dosadas para os diferentes ensaios com idade de 7 dias.	137
Tabela 17 - Resistências de aderência das argamassas dosadas para os diferentes ensaios com idade de 28 dias.	137
Tabela 18 – Perfil de rupturas de corpos de prova ao cisalhamento direto aos 7 dias de idade.	143
Tabela 19 - Custo atual estimado das argamassas industrializadas.	151
Tabela 20 - Custo por unidade de resistência mecânica e de aderência das argamassas industrializadas.	152
Tabela 21 - Custo por litro das argamassas industrializadas estudadas.	152

Tabela 22 - Caracterização do concreto utilizado como substrato para os ensaios de resistência de aderência. 167

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ANOVA – Análise de variância;

INCC – Índice Nacional da Construção Civil;

ISO – International Standard Organization;

NBR – Norma Brasileira;

PVC – Policloreto de vinil;

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux;

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil;

SP (aditivo) – Superplastificante.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE QUADROS	13
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES	16
1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1. OBJETIVO.....	22
1.2. JUSTIFICATIVA.....	23
1.2.1. Justificativa técnica	23
1.2.2. Justificativa ambiental.....	24
1.2.3. Justificativa socioeconômica.....	24
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. REPAROS PONTUAIS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	27
2.1.1. Normalização	27
2.1.2. Procedimento de recuperação de estruturas de concreto.....	29
2.2. ARGAMASSAS DE REPARO	31
2.2.1. Conceituação e propriedades gerais	31
2.2.2. Propriedades específicas de um sistema de reparo.....	33
2.2.3. Argamassas de reparo modificadas com polímeros	36
2.2.4. Argamassas de reparo com adições pozolânicas.....	41
2.3. ADERÊNCIA ENTRE MATRIZES CIMENTÍCIAS	43
2.3.1. Conceituação geral	43
2.3.2. Influência das propriedades reológicas na aderência de materiais cimentícios ..	45
2.4. CONCEITOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS	47
2.4.1. Conceituação geral	47
2.4.2. Caracterização reológica por ensaio de squeeze-flow.....	49

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	53
3.1. APRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO	53
3.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS.....	55
3.2.1. Argamassas industrializadas	55
3.2.2. Argamassas dosadas em laboratório	56
3.2.3. Substrato de concreto	58
3.3. MÉTODOS DE ANÁLISE E EQUIPAMENTOS.....	59
3.3.1. Ensaio de caracterização físico-química.....	60
3.3.2. Ensaio de caracterização reológica em estado fresco	68
3.3.3. Ensaio de desempenho no estado endurecido.....	75
3.3.4. Ensaio para estudo da resistência de aderência	80
3.3.5. Microscopia eletrônica de varredura para avaliação da zona de interface	92
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA.....	97
4.1.1. Fluorescência de raios X	97
4.1.2. Difratomia de raios X.....	98
4.1.3. Massa unitária e massa específica	100
4.1.4. Granulometria.....	100
4.1.5. Análise química.....	105
4.2. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA	107
4.2.1. Densidade e teor de ar aprisionado no estado fresco	107
4.2.2. Ensaio de squeeze-flow	111
4.2.3. Viscosidade e taxa de deformação	115
4.2.4. Tensão de escoamento.....	120
4.2.5. Índice de consistência.....	123
4.3. DESEMPENHO NO ESTADO ENDURECIDO.....	126
4.3.1. Resistência mecânica.....	126
4.3.2. Módulo de elasticidade dinâmico.....	131
4.3.3. Variação dimensional	132

4.4. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA	135
4.4.1. Considerações sobre os resultados de resistência de aderência	141
4.4.2. Influência do comportamento reológico sobre a resistência de aderência	144
4.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	148
4.6. ANÁLISE DE CUSTOS E APLICABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	151
4.6.1. Análise de custos	151
4.6.2. Aplicabilidade na construção civil	153
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	155
5.1. CONCLUSÕES	155
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
APÊNDICES	166
Apêndice A – Caracterização do concreto de substrato utilizado para os ensaios de resistência de aderência.	166
Apêndice B – Curvas de viscosidade e tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação obtidas através do ensaio de squeeze-flow.	168
Apêndice C – Análises estatísticas de variância (ANOVA) dos resultados obtidos nos ensaios.	177

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é atualmente o material mais utilizado para execução de estruturas no Brasil, devido a fatores econômicos, executivos e de durabilidade. Sua matéria prima tem o custo mais baixo que o aço, além de que sua execução em obra não exige mão de obra de grande especialização, um problema comum no país.

Embora o concreto possa ser considerado praticamente eterno, desde que tenha manutenção adequada, está sujeito a apresentar manifestações patológicas de intensidade e incidência significativas, prejudicando aspectos estéticos e sua capacidade resistente (HELENE, 1992).

Espera-se que as estruturas de concreto armado atendam às incumbências a que foram destinadas, considerando segurança, economia, e desempenho do sistema aos seus usuários. Todavia, diversos fatores podem influenciar a segurança e o desempenho que uma estrutura irá proporcionar àqueles que irão desta usufruir. A exceção de acidentes ou catástrofes naturais, que solicitam a estrutura muito além do que fora projetada a suportar, as manifestações patológicas são originadas geralmente por falha humana, em uma das quatro fases fundamentais da vida útil da estrutura de concreto: concepção e projeto, controle tecnológico dos materiais, a execução da estrutura propriamente dita, e por fim, o uso e a manutenção da mesma (SOUZA e RIPPER, 1998).

Frente a isto, é importante e necessário o desenvolvimento de técnicas e materiais que devolvam às estruturas de concreto armado danificadas por mecanismos ou processos de degradação sua capacidade de desempenho, sua aparência estética, segurança ao usuário e durabilidade ao longo dos próximos anos.

Segundo Bauer (2000) a maioria dos danos apresentados em elementos estruturais são do tipo evolutivo, ou seja, poderão comprometer sua estabilidade dentro de certo prazo. Pode-se relacionar as causas de deterioração de uma estrutura em quatro grupos apresentados no Quadro 1.

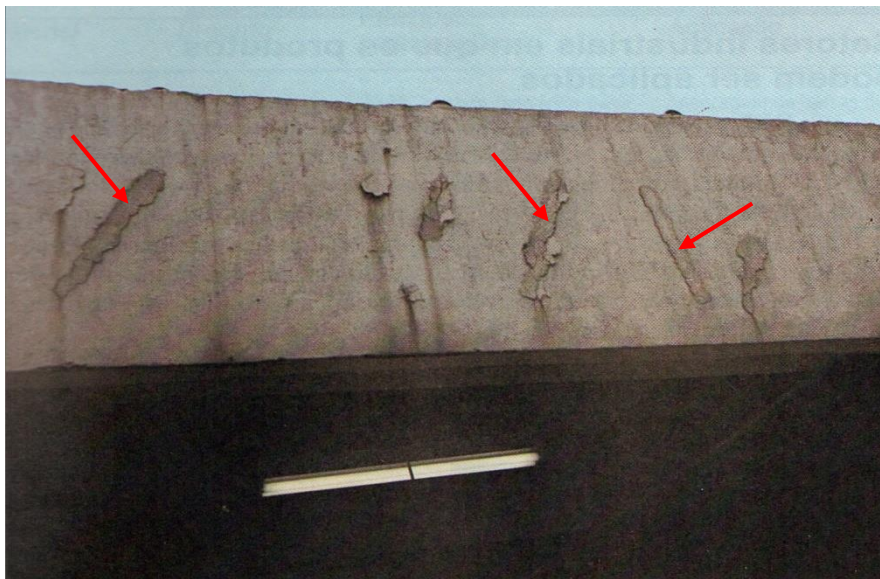
Quadro 1 – Grupos de causas de deterioração de estruturas.

Grupo I	Erros de projeto estrutural
Grupo II	Emprego de materiais inadequados
Grupo III	Erros de execução
Grupo IV	Agressividade do meio ambiente

Fonte: BAUER (2000).

Muitas vezes técnicas inadequadas de reparo estrutural são aplicadas em estruturas de concreto armado. Estas ações, que podem ser resultado da preparação inadequada do substrato ou de material não recomendado para o fim, acabam gerando custos extras de manutenção para a obra, bem como podem levar a um prejuízo ainda maior à estrutura. A Figura 1 mostra uma situação onde a intervenção de reparo não foi bem-sucedida. Pode-se notar que a viga reparada apresenta descolamento do material de reparo, dando-se por falta de resistência de aderência da matriz no substrato.

Figura 1 - Técnica de reparo mal executada em viga de concreto armado.



Fonte: HELENE (1992).

Citam Moreno Junior e Selmo (2007) que o mecanismo de aderência de uma argamassa pode ser dividido em duas etapas intimamente correlacionadas entre si: a adesão inicial e a aderência. A adesão inicial, característica do estado fresco, compreende a eficácia de colagem da argamassa no ato da sua aplicação, enquanto a aderência é a resistência que se desenvolve ao longo do processo de hidratação, uma propriedade de estado endurecido.

A proposta deste estudo de correlacionar características reológicas com resistência de aderência é, sobretudo, testar o quão intimamente ligados estão estas etapas de vida da argamassa de reparo. Não somente avaliando esta relação biunívoca, este trabalho também pretende deitar o horizonte do estudo para o sistema de reparo em si, de inegável importância sobre o sucesso da intervenção construtiva, conforme exposto por Emmons e Vaysburd (1995), e o comportamento deste sistema sob diferentes formas de solicitação mecânica.

O mercado de argamassas de reparo no Brasil oferece uma gama bastante ampla de produtos, sendo que grandes indústrias de materiais de construção são responsáveis pela sua formulação e fabricação. Os custos deste tipo de material são, em comparação com argamassas destinadas a outros usos, relativamente elevados. De acordo com a tabela SINAPI de janeiro de 2017¹, com trecho representado na Tabela 1, o custo de uma argamassa de reparo é cerca de 2,5 vezes maior que o custo do graute, também utilizado como material de reparo.

Tabela 1 - Custo médio de diferentes tipos de argamassas comercializadas no Paraná em janeiro de 2017.

Material	Custo (R\$/kg)
Argamassa polimérica de reparo estrutural	3,67
Argamassa colante AC-I	0,44
Argamassa colante AC-II	0,88
Argamassa colante AC-III	1,34
Argamassa industrializada multiuso, para revestimento interno e externo e assentamento de blocos diversos	0,40
Argamassa piso sobre piso	1,23
Graute cimentício para uso geral	1,46

Fonte: SINAPI (2017)

Por ser um material de alto custo e que envolve responsabilidade estrutural, a obtenção de resultados que ajudem na tomada de decisões em situações reais de Engenharia é de grande valia para a ciência e para o mercado, além de poder contribuir com uma possível normalização técnica brasileira das argamassas de reparo estrutural.

1.1.OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de características reológicas de argamassas de reparo industrializadas e dosadas em laboratório, com base em características físico-químicas das argamassas, nas propriedades mecânicas e na microscopia da interface das mesmas com o substrato de concreto.

¹http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-pr/SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_PR_012017_Desonerado.zip

1.2.JUSTIFICATIVA

1.2.1. Justificativa técnica

O estudo das manifestações patológicas presentes em estruturas de concreto é um tema fundamental para a indústria da construção civil, principalmente com o aumento da preocupação com a durabilidade das estruturas nos últimos anos. A norma técnica brasileira que regula a elaboração de projetos de estruturas de concreto, NBR 6118, deixa claro que estas estruturas devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas quando preconizado o projeto, garantam a sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante seu período de vida útil (ABNT, 2014).

Mesmo com todos os cuidados de projeto, as estruturas apresentam manifestações patológicas ao longo do tempo. Segundo Helene (1992), entende-se por Patologia a parte da Engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis, e que a escolha dos materiais e técnicas de correção depende do diagnóstico do problema, das características da região e das exigências de funcionamento do elemento corrigido.

A norma NBR 15575 (2013) define a vida útil de uma estrutura de concreto armado o período de tempo em que um edifício se presta às atividades para as quais este fora concebido, considerando-se a periodicidade e a correta execução dos serviços de manutenção. A mesma norma estipula uma vida útil prevista mínima de 50 anos para elementos estruturais.

O estudo em especial de argamassas de reparo é substancialmente diferenciado de outros tipos de argamassas presentes na construção civil, devido, em especial, à responsabilidade estrutural a qual este material é submetido. Pereira (2012) levanta esta discussão sobre argamassas colantes, citando que as diferenças entre estas e argamassas de revestimento encontram-se principalmente nos tipos de solicitações as quais as argamassas estarão submetidas e que estas diferenças impactam na formulação e dosagem. Uma argamassa colante precisa de um desempenho adesivo maior que uma argamassa de revestimento para fixar devidamente placas cerâmicas, portanto leva uma carga de aditivos específicos para este fim. Argamassas de reparo, além destes aditivos colantes que garantam a aderência com o substrato de concreto, precisam atingir resistências mecânicas semelhantes ou superiores ao substrato.

Um dos grandes desafios do estudo da resistência de aderência de argamassas de reparo é a validação para o ambiente real. Austin, Robins e Pan (1995) definem uma série de requisitos para ensaios de aderência de reparos. Entre estes, estão a simulação das condições de local; a exposição do reparo às condições ambientais, a indução de esforços típicos da estrutura em serviço; a avaliação da validade dos resultados e a possível reprodução das técnicas em estruturas reais.

1.2.2. Justificativa ambiental

A preocupação com a durabilidade das estruturas é inerente em várias esferas. Estima-se que a liberação de CO₂ oriunda da produção de cimento Portland no planeta corresponda a 7% da sua carga total (SILVA, 2008). A execução de estruturas duráveis ou a obtenção de meios que permitam a recuperação das estruturas danificadas evita a substituição total destas estruturas a curto e médio prazo, o que deve gerar um alívio no consumo do cimento e na emissão de poluentes.

1.2.3. Justificativa socioeconômica

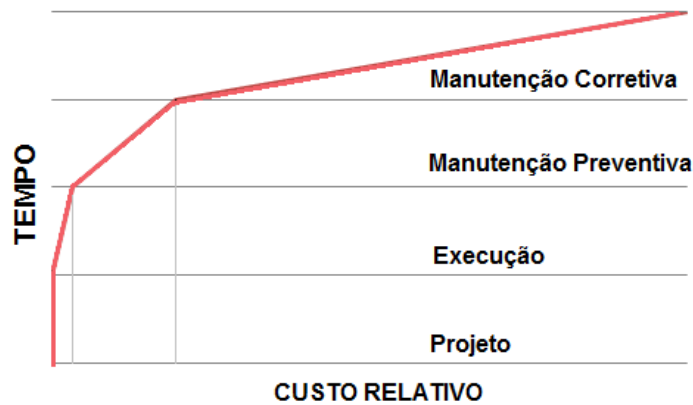
O impacto dos custos de reparo estrutural no PIB de países desenvolvidos é bastante alto. Estima-se que nos Estados Unidos da América o custo anual para recuperação de pontes de concreto armado se encontra entre 18 e 21 bilhões de dólares. (EMMONS e SORDYL, 2006² apud. ZHOU, YE e BREUGEL, 2016). Na Europa, analistas estimam que metade do orçamento anual da construção civil destina-se a obras de manutenção, reabilitação e reparo de estruturas em geral (TILLY e JACOBS, 2007). No Brasil, não há dados sólidos disponíveis que forneçam a dimensão dos custos de reparo estrutural em concreto armado e seu impacto perante à economia.

De acordo com estudo de Sitter (1984), dividindo as etapas construtivas e de uso de uma edificação em quatro períodos distintos correspondentes a projeto, execução, manutenção preventiva efetuada antes dos cinco primeiros anos e manutenção corretiva após o surgimento

² P.H. Emmons, D.J. Sordyl, The state of the concrete repair industry and a vision for its future, Concr. Repair Bull. (2006) 7–14

dos problemas, a cada uma corresponderá um custo que segue uma progressão geométrica de razão cinco (Figura 2).

Figura 2 - Lei da evolução de custos de Sitter.



Fonte: SITTER (1984).

Dentro da teoria formulada por Sitter (1984), reparos localizados correspondem a um tipo de intervenção denominada manutenção corretiva, que tende a ter seu custo operacional muito superior a uma medida preventiva, como aumento do cobrimento da armadura em uma peça estrutural. Este custo não decorre apenas do tipo de material empregado na manutenção, mas principalmente pelas dificuldades de sua execução. A execução de reparos exige muitas vezes interdições de ambientes de trabalho, acessos a lugares insalubres e de alto risco aos operários, além de precisar contar com equipamentos e mão de obra de maior especialização. Posto isto, uma intervenção de manutenção deve exigir o mínimo de tempo de operação e não deve permitir retrabalho. O pleno conhecimento do material a ser aplicado neste tipo de serviço é de fundamental importância técnica e econômica.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho conta com a seguinte estrutura:

- O capítulo 1 refere-se à introdução ao tema, apresentação do objetivo do trabalho e suas limitações;
- O capítulo 2 apresenta pesquisa bibliográfica que embasa a teoria do trabalho:

- O subcapítulo 2.1 trata da questão do reparo estrutural, a normalização, técnicas e procedimentos de intervenção e a definição de sistema de reparo e compatibilização;
- O subcapítulo 2.2 apresenta o estado da arte do estudo das argamassas de reparo, os efeitos de adição ou substituição de materiais em argamassas comuns no comportamento destas como material de reparo estrutural em vários aspectos;
- O subcapítulo 2.3 aborda a teoria de aderência entre materiais de base cimentícia, das formas de ligação entre dois materiais de idades diferentes e as variáveis que influenciam no comportamento das ligações;
- O subcapítulo 2.4 trata dos conceitos de Reologia dos materiais, suas aplicações para estudo do comportamento reológico de argamassas e a teoria utilizada neste trabalho.
- O capítulo 3 apresenta a metodologia do estudo, descrevendo os materiais e métodos de análise do trabalho;
- O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios através de gráficos, tabelas, comparações e correlações;
- O capítulo 5, por fim, apresenta as considerações finais do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. REPAROS PONTUAIS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.1.1. Normalização

De acordo com Catarino, Gonçalves e Ribeiro (2000), na década de 1980 foi criado o subcomitê 8 da CEN (*Comité Européen de Normalisation*) que iniciou a elaboração de um conjunto de normas que reúne as diretrizes de trabalho para proteção e reparo de estruturas de concreto.

Em 2005 este trabalho foi publicado na Europa com o nome de “Produtos e Sistemas para Protecção e Reparação de Estruturas de Betão³” e está dividido em dez (10) partes pertencentes à série de normas EN 1504 conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Partes da série normativa EN 1504:2005

EN 1504-1	Definições
EN 1504-2	Proteção de superfície
EN 1504-3	Reparos estruturais e não estruturais
EN 1504-4	Aderência estrutural
EN 1504-5	Injeções
EN 1504-6	Ancoragens
EN 1504-7	Proteção do aço
EN 1504-8	Controle de conformidade
EN 1504-9	Princípios gerais
EN 1504-10	Controle de qualidade

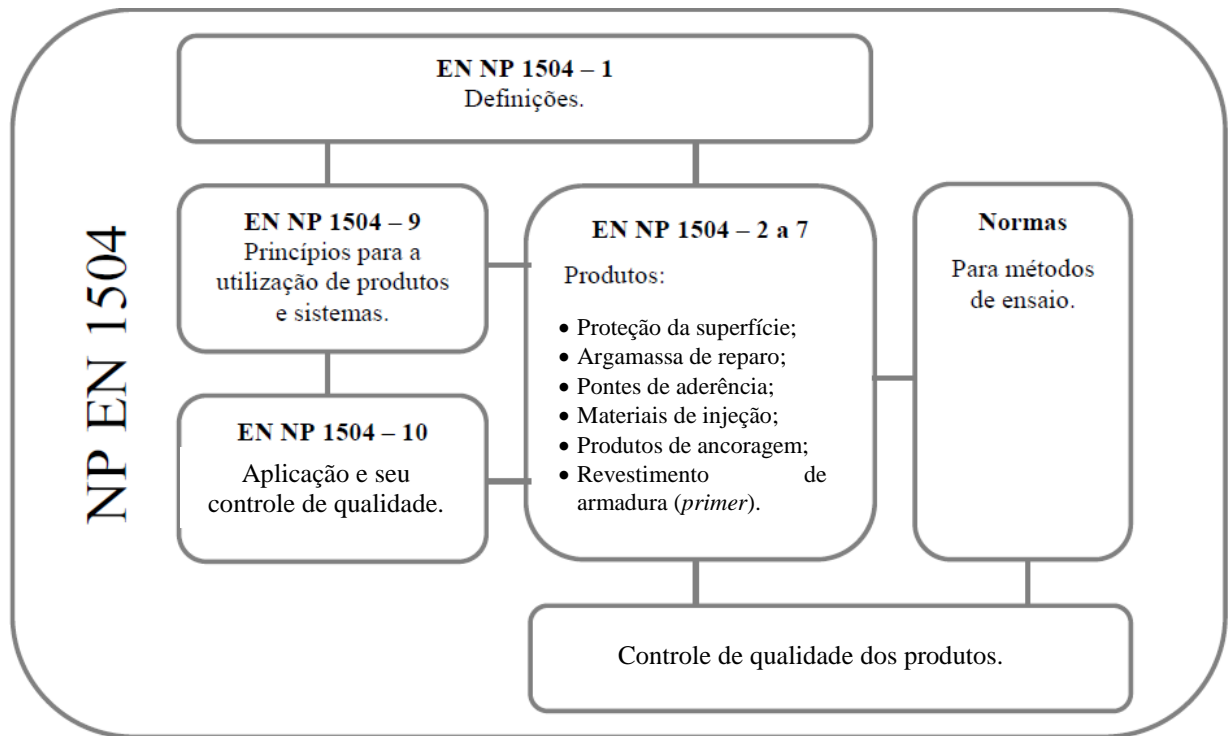
Fonte: SOUSA (2011).

Sousa (2011) apresenta uma correlação esquemática entre as partes da norma, dividindo-a em cinco (5) subgrupos conforme apresentado na Figura 3. Deste conjunto, a parte

³ Tradução para português de Portugal. Esta norma está disponível nos idiomas dos países que compõem a União Europeia.

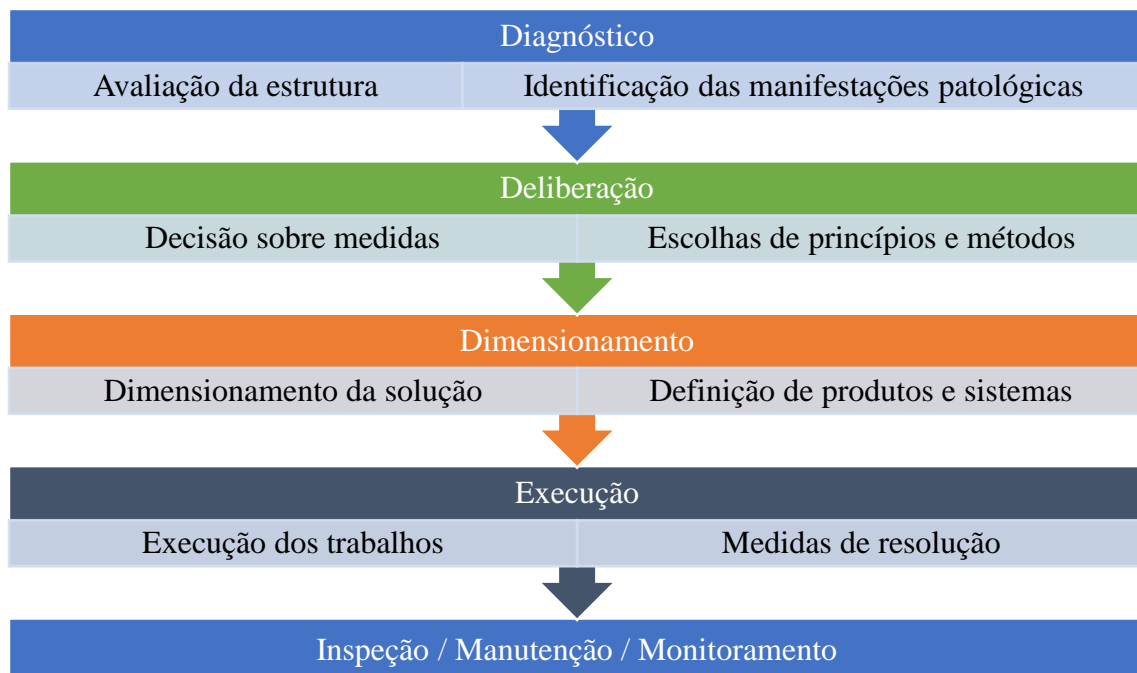
9, que trata dos princípios para a utilização de produtos e sistemas de reparo, aborda as principais etapas de uma intervenção de recuperação estrutural, conforme Figura 4.

Figura 3 – Representação esquemática do conteúdo da EN 1504



Fonte: Adaptado de SOUSA (2011).

Figura 4 – Etapas de um trabalho de recuperação estrutural previstas na EN 1504-9



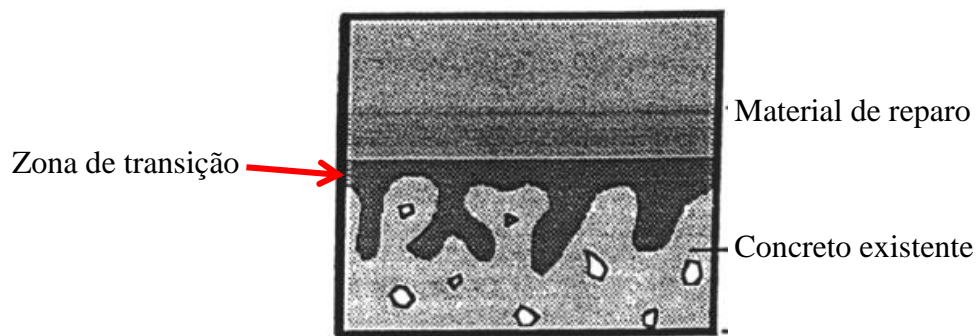
Fonte: Adaptado de SILVA (2008).

No Brasil não há atualmente normatização específica para reparos de estruturas de concreto, porém as técnicas vêm sendo estudadas e desenvolvidas desde a década de 1980. Trabalhos como de Helene (1992), Souza e Ripper (1998) e a coletânea RED Reabilitar (2003) são algumas das referências técnicas que detalham materiais e métodos de reparo estrutural utilizados na construção civil.

2.1.2. Procedimento de recuperação de estruturas de concreto

Emmons e Vaysburd (1995) definem um reparo estrutural localizado como um sistema constituído por três fases distintas: o concreto existente (substrato), o material de reparo (matriz) e a zona de transição entre estas (área de contato). Este modelo pode ser exemplificado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo de um sistema de reparo em estrutura de concreto

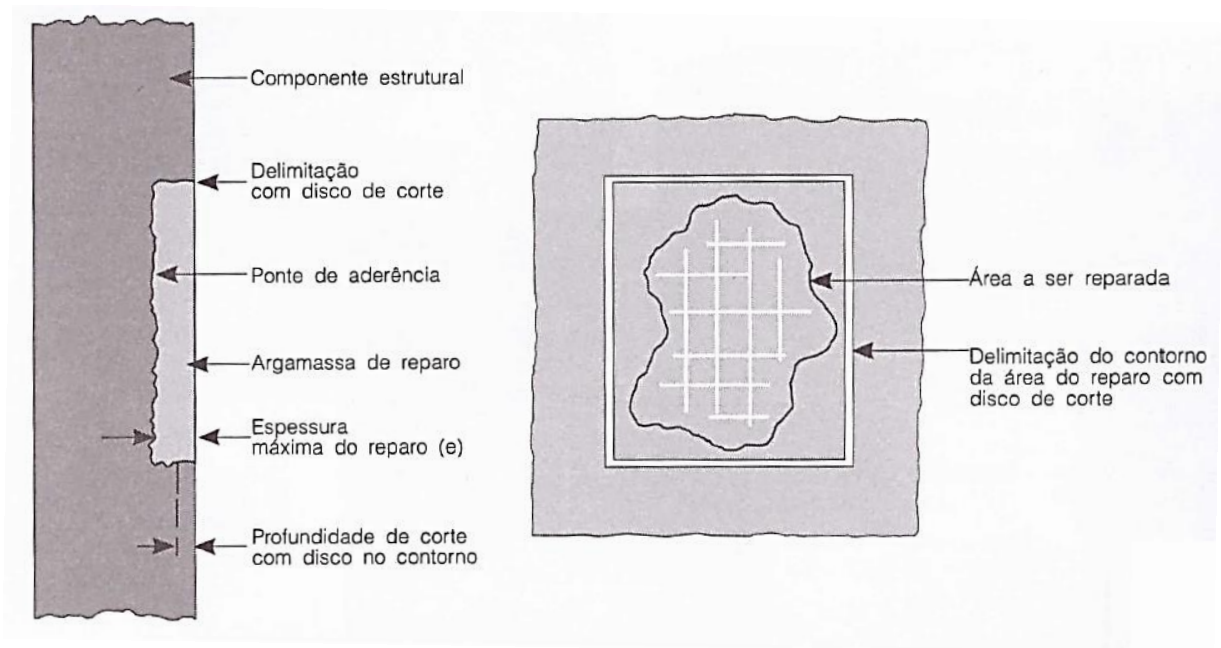


Fonte: EMMONS e VAYSBURD (1995).

Helene (1992) apresenta na Figura 6 procedimento de operação quanto à preparação do substrato que recebe o reparo. Medeiros (2002) cita que a delimitação das áreas deterioradas deve ser o primeiro passo em uma atividade de recuperação estrutural, adotando geometria bem definida para a área de reparo.

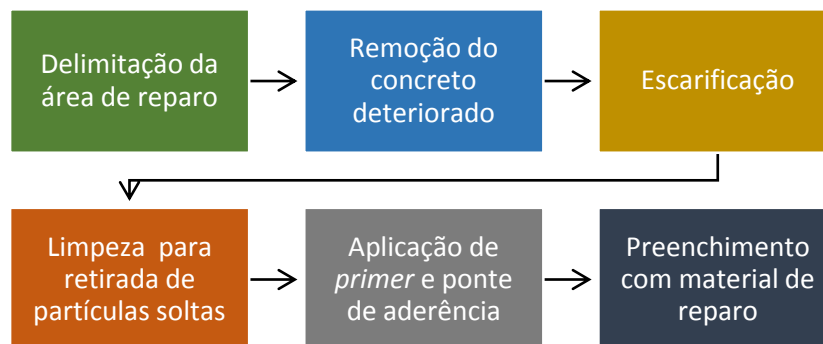
Após a delimitação da área procede-se a remoção do concreto deteriorado até que o local do reparo esteja completamente livre deste material. Esta sequência é proposta pela literatura e segue os passos propostos por Helene (1992), Souza e Ripper (1998) e Medeiros (2002) apresentados na Figura 7.

Figura 6 - Procedimento de operação de reparo localizado em uma estrutura de concreto.



Fonte: HELENE (1992).

Figura 7 – Etapas para execução de reparo estrutural em concreto.



Fonte: Adaptado de HELENE (1992), SOUZA e RIPPER (1998) e MEDEIROS (2002).

O procedimento de escarificação é importante para aumentar a superfície do reparo, através do aumento da rugosidade na região. A escarificação pode ser feita com a utilização de ponteira manual ou mecânica ou com o jateamento de areia ou água, dependendo da extensão da área a ser reparada. Após a escarificação, recomenda-se a limpeza da superfície com escova de aço para que a presença de partículas soltas não comprometa a aderência da matriz com o substrato.

A aplicação de *primer* – tinta anticorrosiva aplicada nas armaduras – e ponte de aderência no substrato não é uma etapa obrigatória, pois materiais de reparo industrializados

atualmente dispensam a utilização destes produtos para intervenções em obras comuns. Além disso, por razões técnico-econômicas, um sistema de reparo completo em determinados casos se torna inviável (MEDEIROS, 2002).

2.2.ARGAMASSAS DE REPARO

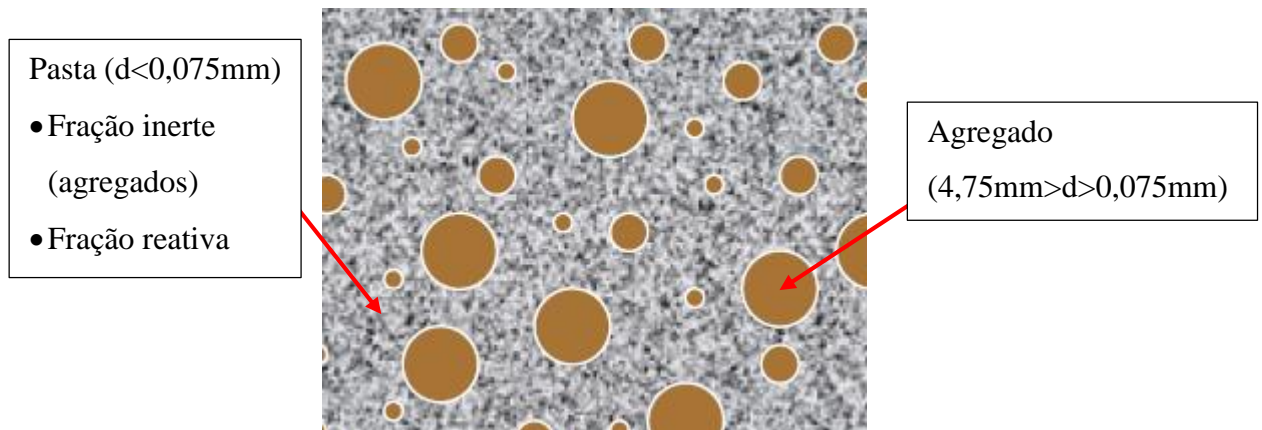
2.2.1. Conceituação e propriedades gerais

Entende-se por argamassa de reparo um tipo especial de argamassa que apresente a capacidade de adaptação a um substrato de estrutura danificada e desenvolva características de estado endurecido que se aproximem ao máximo daquelas próprias deste substrato, conferindo a este o restabelecimento de sua funcionalidade com segurança.

Dentro do universo das argamassas, uma argamassa de reparo proporciona resistência mecânica e módulo de elasticidade superiores às argamassas de revestimento, de assentamento e colantes. A fim de recuperar elementos estruturais, é necessária a obtenção de altas resistências iniciais, ausência de retração, controle da expansão, elevada aderência ao substrato ou baixa permeabilidade, propriedades estas obtidas através do emprego de aditivos e adições de diferentes tipos (HELENE, 1992).

É uma composição multifásica de materiais inertes e reativos, com uma pasta envolvendo agregados de origem mineral. A pasta é formada pela fração fina, passante pela peneira #200, composta por aglomerante – que pode ser de cimento Portland ou de base polimérica ou resina, adições e aditivos, formando a fração reativa e partículas inertes que compõem partículas de agregado de dimensão inferior a 0,075 milímetros (fração inerte), enquanto a fração grossa é composta por agregados em partículas de dimensão superior a esta até o limite de 4,75 mm (peneira 4). Esta composição permite o correto funcionamento reológico da argamassa no estado fresco, sendo que a relação entre a fração pasta e a fração agregado determina um bom ou mau comportamento reológico do material. A interação entre agregados quando solicitados a uma tensão de cisalhamento sem uma adequada lubrificação pela pasta, ou seja, sem um volume de pasta suficiente, prejudica as propriedades finais da argamassa (COSTA, 2006). A Figura 8 apresenta a representação esquemática da composição de uma argamassa de reparo.

Figura 8 - Representação da composição de uma argamassa de reparo.



Fonte: Adaptado de COSTA (2006).

Argamassas para reparo localizados são normalmente aplicadas manualmente ou com o auxílio de espátula. Deve, portanto, possuir consistência adequada para esta finalidade, que pode ser determinada através de ensaio *flow-table* e pode ser exemplificada conforme Figura 9.

Figura 9 - Consistência típica de argamassas de reparo.



Fonte: O autor (2016).

A gama de materiais de reparo disponíveis no mercado da construção civil é elevada e essa variedade se dá principalmente pelo ambiente ao qual o reparo estará submetido. Helene (1992), além de Cusson e Mailvaganam (1996) propõem uma classificação para estes materiais e que até os dias de hoje segue sendo utilizada nos produtos de mercado:

- a. Argamassas de base cimentícias: a base de cimento Portland comum, cimento aluminoso, misturas destes dois cimentos ou com agentes expansivos;
- b. Argamassas de base cimentícias modificadas com polímeros: argamassas com adição de polímeros como borracha de estireno-butadieno (SBR), acetato de

vinil-etileno (EVA), acetato de polivinil (PVA), éster poliacrílico (PAE), entre outros.

- c. Argamassas de base resina: podem ser de base epóxi, poliéster ou poliuretano.

Diante desta variedade de possíveis materiais tem-se um mercado cada vez mais diversificado de argamassas de reparo industrializadas, ao passo que ainda no Brasil não há normalização técnica vigente para este assunto. Os requisitos de qualidade de argamassas de reparo são baseados em normas para argamassas de revestimento e colantes com adaptações, bem como na normalização europeia EN 1504 (seção 3).

2.2.2. Propriedades específicas de um sistema de reparo

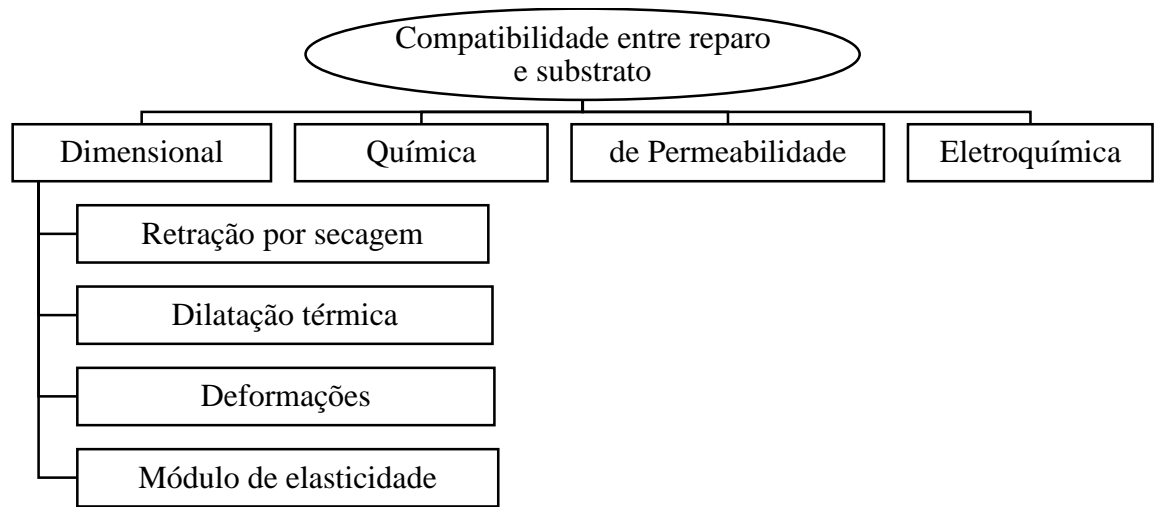
O estabelecimento de propriedades e requisitos de um material de reparo deve ter como foco o desempenho esperado do sistema. Emmons e Vaysburd (1995) citam que a principal razão para o não sucesso de reparos estruturais duráveis é o foco exclusivamente na própria fase de reparo, ignorando a consequência deste procedimento sobre o desempenho global da estrutura, quebrando a compatibilidade do sistema.

Para Schueremans *et al.* (2011) é importante levar em conta a caracterização química, estética, mineralógica, física e mecânica de um material para avaliar o desempenho global do reparo. A compatibilidade só pode ser alcançada seguindo uma abordagem multidisciplinar, onde todas as partes envolvidas no projeto possam avaliar os requisitos de desempenho a serem apresentadas para a argamassa de reparo e então seja definido o material para este fim.

A compatibilidade de um sistema de reparo compreende o equilíbrio das propriedades eletroquímicas e dimensionais entre o material de reparo e o substrato existente, que garante que uma estrutura reparada resista a todas as tensões induzidas por cargas, mudanças de volume e fenômenos eletroquímicos sem prejuízos e deterioração de um ambiente especificado durante um determinado período de tempo (EMMONS e VAYSBURD, 1995). Este conceito está apresentado na Figura 10.

Morgan (1996) cita que a falta de compatibilidade dimensional é o principal problema enfrentado pela indústria especializada em reparo de estruturas de concreto. O maior efeito da falta de compatibilidade do sistema é o descolamento do reparo, causado pelos seguintes fatores: excessivo índice de retração, tamanho e forma do reparo e incapacidade de absorção de esforços e deformações.

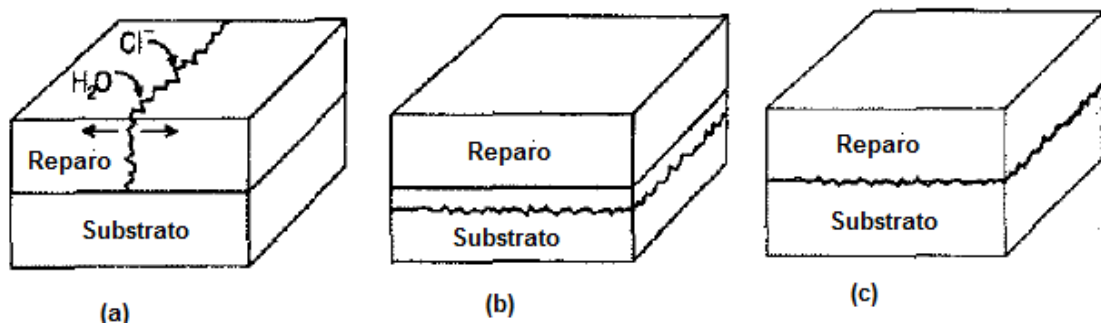
Figura 10 - Fatores que compreendem a compatibilidade de um sistema de reparo.



Fonte: EMMONS e VAYSBURD (1995).

Cusson e Mailvaganam (1996) apresentam as possibilidades de falha no reparo localizado, podendo se dar em três situações: (a) fratura transversal no próprio reparo, (b) fratura longitudinal no substrato ou (c) fratura longitudinal na interface de contato. A Figura 11 exemplifica estes casos.

Figura 11 - Tipos de falha no reparo localizado em estruturas de concreto



Fonte: CUSSON e MAILVAGANAM, 1996.

Estes tipos de falhas estão ligados diretamente ao módulo de elasticidade do material, quando se trata de capacidade de adaptação a carregamentos da estrutura. Mangat e O'Flaherty (2000) afirmam que, ao contrário do conceito de compatibilidade proposto por outros autores, reparos feitos com materiais de alto módulo de elasticidade apresentam melhor interação com o substrato, devido a maior eficácia de transferência de tensões para o substrato durante o período de retração por secagem, reduzindo assim a tensão de retração restringida. Reparos efetuados com materiais de baixa rigidez não apresentam interação estrutural com o substrato

e a transferência de tensão entre as fases não acontecem e, portanto, são mais propensos a sofrer danos devido à retração restringida.

Emberson e Mays (1990)⁴ *apud* Morgan (1996) estabeleceram a relação entre o material de reparo e o concreto a ser reparado com relação ao comportamento no estado endurecido, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Requisitos gerais de argamassas de reparo para compatibilidade estrutural no estado endurecido

Propriedade	Relação da matriz de reparo (R) com o substrato de concreto (C)
Resistência à compressão, tração e flexão	$R \geq C$
Módulo de elasticidade	$R \sim C$
Coeficiente de Poisson	Depende do módulo e do tipo de material
Coeficiente de dilatação térmica	$R \sim C$
Aderência à tração e ao cisalhamento	$R \geq C$
Retração por secagem	$R \geq C$
Deformabilidade	$R \sim C$
Desempenho à fadiga	$R \geq C$

Fonte: Adaptado de EMBERSON e MAYS (1990) apud MORGAN (1995).

A compatibilidade adequada do sistema de reparo também depende da estabilidade da matriz quanto a retração por secagem. Esta está associada com a perda de umidade da pasta de cimento hidratado, onde a saída da água presente entre as moléculas da estrutura C-S-H e a tortuosidade deste caminho de saída entre a rede capilar causa força motriz que induz a retração do material (METHA e MONTEIRO, 2006; FARZADNIA *et al*, 2015). A taxa de retração depende da temperatura, das condições de umidade do ambiente e da velocidade do vento, fatores que afetam diretamente a taxa de evaporação da água (LENART, 2015). Segundo Al-Alawi, Brooks e Hassan (2001) e Aliche e Mallat (2011) uma alta retração da argamassa de reparo por falta de cura adequada prejudica consideravelmente a interface entre concreto e reparo.

Medeiros (2002) realizou estudo acerca de propriedades de treze argamassas de reparo divididas quanto à sua fabricação, como caracterização básica, compatibilidade mecânica com o concreto e estabilidade eletroquímica do aço. Os resultados mostraram diferença de comportamento entre as marcas disponíveis no mercado para reparos localizados em concreto.

⁴ EMBERSON, N. K.; MAYS, G. C. Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete, part I: properties of repair systems. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, n. 152, p. 147-160, set. 1990, ISSN 0024-9831.

As argamassas poliméricas tiveram suas características melhoradas – exceto a retração por secagem, onde o aditivo de base acrilato se mostrou com desempenho superior ao EVA. Argamassas cimentícias com cimento de alta resistência inicial apresentaram melhores resultados que aquelas com cimento composto com fíler calcário.

Kormann *et al* (2003) ensaiou quatro tipos de argamassas de reparo em comparação a um concreto de referência para uso em reparos localizados em estruturas hidráulicas sujeitas a fluxo de alta velocidade. Concluiu-se que para este tipo de situação a argamassa epoxídica obteve melhores desempenhos com relação às argamassas com sílica ativa, poliméricas e com fibra de aço, conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação de desempenho de diferentes tipos de argamassa de reparo frente a diversos ensaios.

Teste	Tipo de argamassa de reparo			
	Epoxídica	Sílica ativa	Fibra de aço	Polimérica
Resistência à abrasão	Alto	Baixo	Moderado	Baixo
Adesão por ensaios de tensão direta	Alto	Moderado	Moderado	Baixo
Ensaio de tensão direta	Alto	Moderado	Moderado	Baixo
Resistência à compressão	Alto	Moderado	Moderado	Moderado
Resistência à flexão	Alto	Moderado	Moderado	Baixo
Tempo de cura - resistência inicial	Alto	Baixo	Baixo	Baixo
Resistência aos raios UV	Baixo	Moderado	Moderado	Baixo
Módulo de elasticidade tangente	Baixo	Moderado	Moderado	Moderado
Permeabilidade	N.E.	Alto	Moderado	N.E.
Coefficiente de dilatação	Baixo	Alto	Alto	Moderado

Fonte: KORMANN et al. (2003).

2.2.3. Argamassas de reparo modificadas com polímeros

Segundo Ohama (1995) a modificação de concretos e argamassas com polímeros começou a ser estudada em 1967 no simpósio da RILEM, em Paris, com o tema “*Synthetic Resins in Building Materials*”. Na segunda metade da década de 1960, Nutt⁵ desenvolveu um sistema chamado *Estercrete*⁶, um concreto modificado com resina de poliéster. Na década de

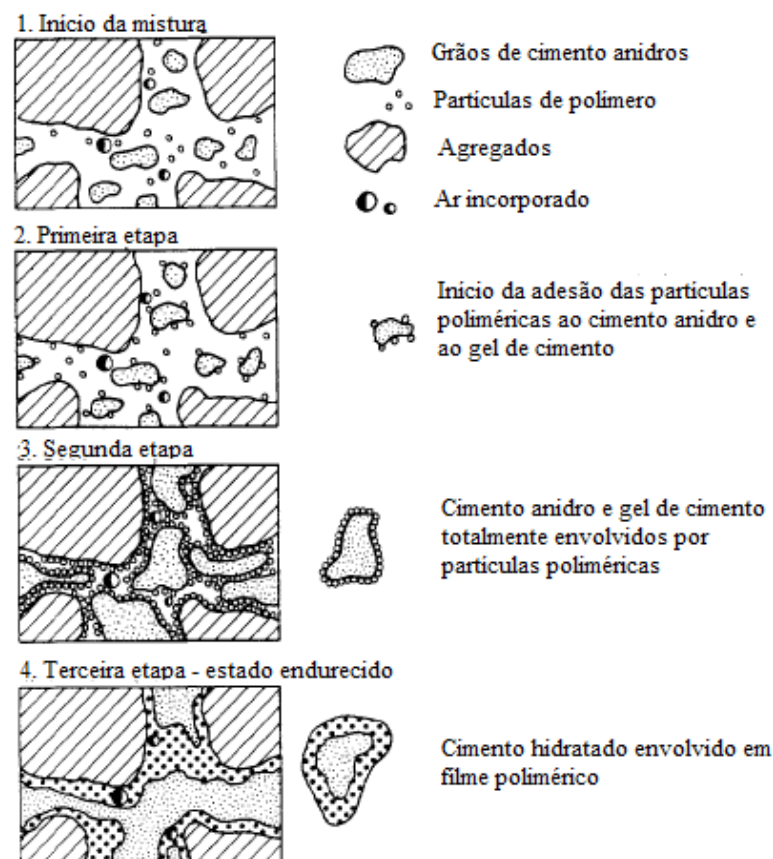
⁵ Nutt, W. O. *Plastics in Building Structures*, (Proceeding of a Conference Held in London, 14 a 16 de junho de 1965), pp. 83-88, Pergamon Press, Oxford (Out. 1966)

⁶ Nutt, W. O. British Patent 1,065,053 (Abr. 1967)

1980, concretos e argamassas modificados com polímeros apareciam como alguns dos principais produtos da indústria da construção civil de países desenvolvidos.

O polímero é adicionado à mistura em estado fresco dissolvido ou em pó dispersível em água. Durante o endurecimento e a hidratação do cimento, ocorre a formação de uma película de polímero aderido aos hidratos do cimento (GEMERT *et al*, 2005). Su (1995) havia observado o efeito de polímeros nas características de estado fresco de argamassas. A presença de material polimérico facilita a mistura por criar efeito de rolamento entre grãos de cimento e agregado pelas suas partículas e o ar incorporado, resultando em uma mistura mais homogênea e plástica, reduzindo a possibilidade de segregação e exsudação. A Figura 12 mostra o efeito da adição de polímeros na mistura de argamassas.

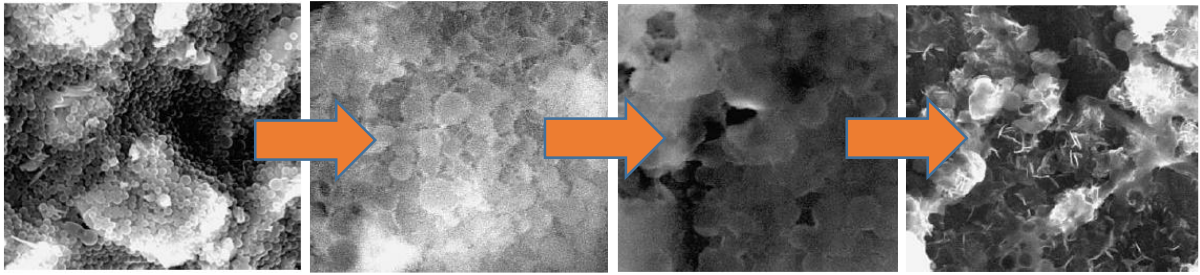
Figura 12 - Efeito da adição de polímero em mistura de argamassa nos estados fresco e endurecido.



Fonte: SU (1995).

Gemert *et al.* (2005) apresenta na Figura 13, através de microscopia as quatro etapas esquematizadas por Su (1995) na Figura 12.

Figura 13 - Formação do filme polimérico em material cimentício, do início da mistura até a coalescência.



Fonte: GEMERT et al (2005).

A adição de polímeros e resinas em argamassas tende a criar um material de propriedades adequadas para reparos em estruturas. De acordo com Aggarwal, Thapliyal e Karadede (2005), a adição de elementos acrílicos e epoxídicos melhora consideravelmente as propriedades gerais das argamassas, tanto no comportamento mecânico quanto na proteção das armaduras – resistência mecânica, aderência e proteção do aço.

Aggarwal, Thapliyal e Karadede (2007) citam ainda que as argamassas modificadas com epóxi são de uso recomendado em trabalhos de reparo em ambientes úmidos e industriais, devido as suas características físicas. Conforme exposto no Quadro 4, argamassas com epóxi são superiores em todos os quesitos, exceto resistência aos raios UV e situações onde se deseja um alto módulo de elasticidade. Por ter este expressivo número de qualidades, este material é mais caro que outros tipos de argamassas, sendo sua utilização mais voltada para reparo de obras específicas de grande responsabilidade estrutural.

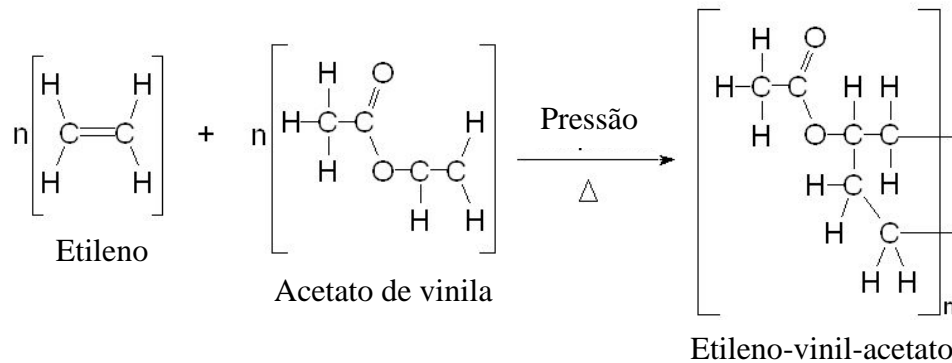
Para obras e intervenções comuns, é amplamente utilizado na formulação de argamassas de reparo polímeros de látex, como EVA, acrilato, borrachas e carboxilatos, sendo que cada polímero responde de forma diferente como adição a argamassas.

Medeiros, Helene e Selmo (2009) trabalharam sobre os benefícios e vantagens que polímeros como EVA e acrilato fornecem à zona de interface entre a argamassa de reparo e o concreto antigo, no que diz respeito às propriedades mecânicas. Concluiu-se que houve melhoria nas propriedades da argamassa, quanto à compressão, tração e cisalhamento direto, bem como houve melhoria nas condições de cura.

O EVA – etileno-vinil-acetato – é um copolímero termoplástico obtido pela copolimerização do acetato de vinila (PVA) com etileno (Figura 14). Sua utilização como adição em argamassas confere melhorias em propriedades no estado fresco, como viscosidade,

consistência, plasticidade e trabalhabilidade, além de atuar no estado endurecido, propiciando maior resistência mecânica e durabilidade (OLIVEIRA, 2004).

Figura 14 - Estrutura química de formação do EVA.



Fonte: O autor (2017).

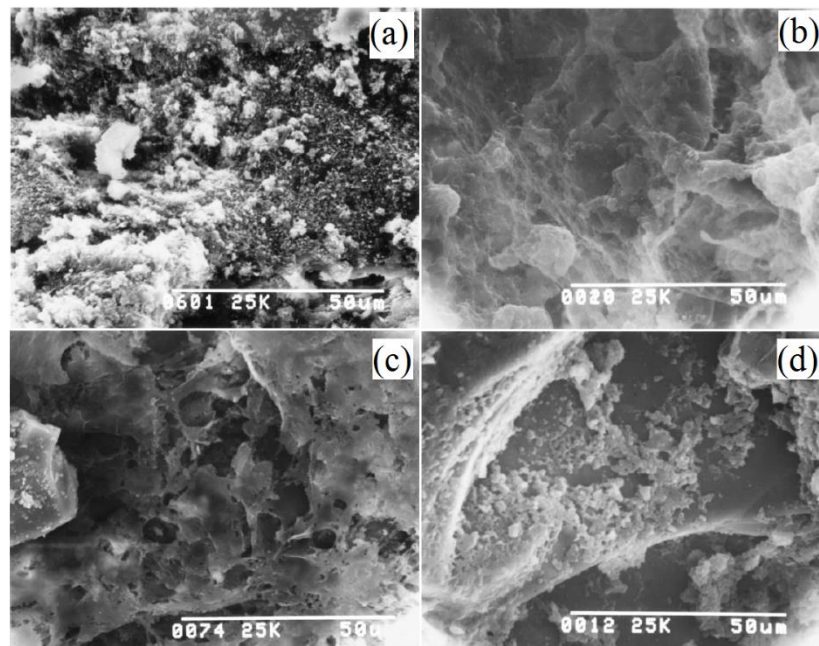
Em contrapartida ao citado por Oliveira (2004), a adição de polímero EVA causa retardamento da pega de materiais cimentícios. A adição do polímero reduz a energia cinética de evolução de coesão do cimento, retardando o ganho de resistência e diminuição do limite máximo de tensão nas primeiras idades (MESSAN, IENNY e NECTOUX, 2011). Este é o mesmo efeito notado por Ukrainczyk e Rogina (2013) ao estudarem argamassas de cimento de aluminato de cálcio modificadas com borracha de butadieno-estireno. Neste estudo, a borracha promoveu melhora nas características reológicas no estado fresco, absorção de água e porosidade, além de expressivo aumento na resistência à tração. Em contrapartida, houve decréscimo na resistência à compressão. Para Ukrainczyk e Rogina (2013), a adição de 0,0045% de carbonato de lítio (Li_2CO_3) em relação à massa de aglomerante é suficiente para normalizar o tempo de pega.

A adição de polímeros influencia na redução da porosidade. O estudo de Ramli, Tabassi e Hoe (2013) mostrou que a porosidade em argamassas modificadas com borracha de butadieno-estireno, éster poliacrílico e EVA reduziu significativamente ao longo de 18 meses de cura ao ar, com valores de 0,89%, 0,98% e 2,91% respectivamente, em comparação às amostras não modificadas, com porosidade de até 8,05%. Ramli e Tabassi (2012) observaram também a evolução da resistência mecânica em função da redução de porosidade, para condição de cura ao ar livre e relação água-cimento fixa. No estudo de Ukrainczyk e Rogina (2013) a adição de 9% de borracha de butadieno-estireno sobre a massa de cimento de aluminato em argamassa reduziu mais de 2% a porosidade da matriz.

Afridi *et al* (2003) realizaram estudo que avaliou a coalescência de partículas poliméricas em argamassas em pó modificadas com polímero. A coalescência provocada pela formação de películas poliméricas nas argamassas modificadas com este material envolve o material hidratado de cimento e os agregados, favorecendo a distribuição de tensões na matriz. A Figura 15 mostra através de microscopia eletrônica o efeito da adição polimérica.

Em (a) observa-se a estrutura de uma argamassa não modificada, enquanto em (b) tem-se argamassa modificada com EVA, em (c) argamassa modificada com borracha de butadieno-estireno e (d) carboxilato vinílico. Nota-se que diferentes tipos de polímero criam estruturas de coalescência diferentes.

Figura 15 - Microestrutura de argamassas modificadas com diferentes tipos de polímero em comparação à argamassa não modificada.



Fonte: AFRIDI et al. (2003).

Com relação à compatibilidade do sistema, um estudo de Al-Alawi, Brooks e Hassan (2001) analisou a compatibilidade de argamassas de cimento Portland comum e modificadas com cinzas de alto forno, sílica, polímero acrílico e epóxi, unidas a substrato de concreto de resistência 50 MPa aos 28 dias. Chegou-se à conclusão que a argamassa polimérica foi a que melhor se adaptou ao concreto utilizado no estudo, devido ao seu módulo de elasticidade e índice de retração similares ao do concreto. Lenart (2015) encontrou melhoria no índice de retração ao utilizar álcool polivinílico (PVA) e borracha de butadieno-estireno como adições, sendo que a borracha apresentou melhorias mais significativas.

2.2.4. Argamassas de reparo com adições pozolânicas

A adição de materiais pozolânicos em compostos cimentícios já vem sendo aplicada há tempos na construção civil para melhoria das condições da zona de transição entre a pasta e os agregados. Metha e Monteiro (2006) explicam que três características da reação pozolânica tornam seu uso tecnicamente interessante em materiais cimentícios:

1. Torna mais lenta a reação química, diminuindo a taxa de liberação de calor na mistura (com a contrapartida de desacelerar o ganho de resistência);
2. Há consumo de cal na reação provocada pela reação pozolânica ao invés da sua produção, como em uma mistura de cimento Portland pura, o que influencia positivamente na durabilidade em ambientes ácidos.
3. Reduz a porosidade e preenche espaços capilares, garantindo maior resistência e impermeabilidade do sistema.

Pode-se resumir o efeito da pozolana na mistura cimentícia a partir das equações (1) e (2) (METHA e MONTEIRO, 2006):

Cimento Portland comum:



Cimento Portland modificado com pozolana:



A redução da velocidade de reação se faz importante em um sistema de reparo na avaliação da compatibilidade pelo problema levantado por Farzadnia *et al* (2015), pois reduz a taxa de perda de água da matriz e consequentemente a força motriz gerada por este fenômeno, reduzindo a retração por secagem.

Estudos de Khaleel e Razak (2012) e Mobili *et al* (2016) avaliaram a adição de metacaulim e cinzas volantes em argamassas. O primeiro estudo mostrou que a substituição de cimento por metacaulim afetou consideravelmente o tempo de início e fim de pega, passando de 300 e 500 minutos, respectivamente, para 800 e 930 minutos quando substituídos 15% da massa de cimento. Já a utilização de cinzas volantes não impactou de forma tão expressiva quanto. O estudo de Mobili *et al* (2016) tratou da ativação alcalina de metacaulim e cinzas volantes e o efeito na porosidade, alcalinidade, retração e resistência mecânica. A retração livre

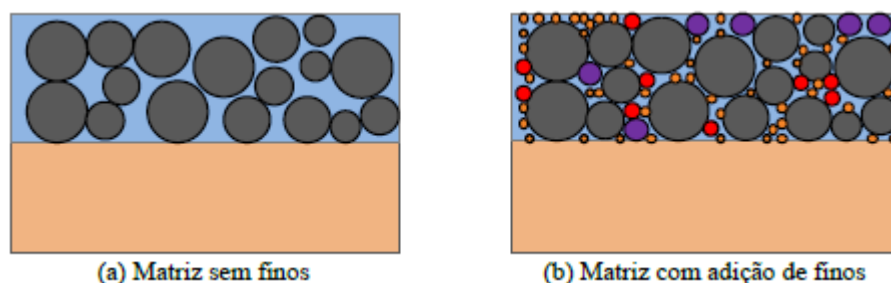
se apresentou maior em relação a argamassas comuns, porém a retração restringida foi menor pela redução do módulo de elasticidade dinâmico – até 50% em relação à referência.

A porosidade foi tratada em estudos de Szemerey-Kiss, Török e Siegesmund (2013) e Chen, Wu e Zhou (2013). Chen, Wu e Zhou (2013) afirmam que a resistência mecânica está inversamente ligada à porosidade para argamassas cimentícias. Szemerey-Kiss, Török e Siegesmund (2013) citam que a perda de umidade em argamassas de reparo é um processo complexo que é majoritariamente controlado pela distribuição e pelo tamanho dos poros entre ligante e agregados. A adição de sílica ativa atua na forma de ocupação dos espaços dos poros, controlando esta perda de umidade.

Alliche e Mallat (2011) investigaram comportamento mecânico e a zona de interface entre argamassa de reparo e concreto para dois tipos de argamassa, uma delas a base de cal reforçada com fibras e a outra comum com adição de sílica. Notou-se neste estudo que a sílica tende a melhorar a resistência mecânica das argamassas e possui melhor comportamento de ligação, além de reduzir a retração por secagem. A adição de sílica em argamassas melhora propriedades mecânicas, como o módulo de Young, resistência à compressão e à flexão (BARKOULA *et al*, 2016).

Costa (2014) cita que a adição de partículas finas na matriz pode reduzir a extensão e a porosidade da interface, por efeito físico ou químico, e, por apresentarem uma área específica elevada, atuam no preenchimento dos vazios entre as partículas (Figura 16), migram para a interface preenchendo irregularidades do substrato e atuam como ponto de nucleação das partículas de cimento, acelerando as reações de hidratação.

Figura 16 - Atuação de partículas finas em materiais cimentícios.



Fonte: COSTA (2014).

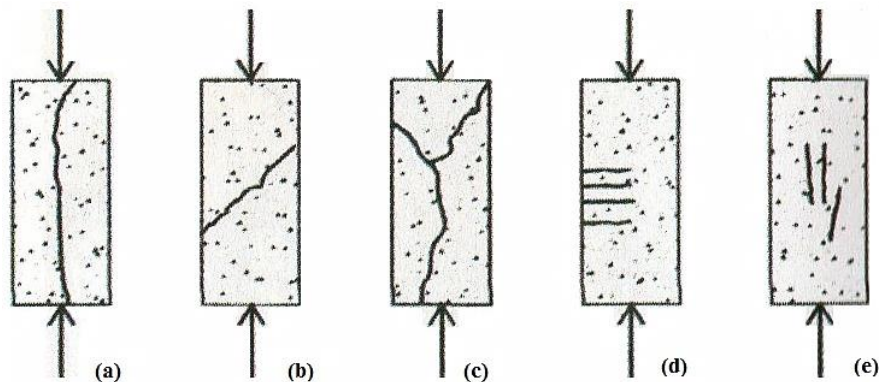
2.3.ADERÊNCIA ENTRE MATRIZES CIMENTÍCIAS

2.3.1. Conceituação geral

Aderência é a capacidade de ligação entre dois meios distintos através de mecanismos de ligação que acontecem em uma superfície comum a ambos. Kinloch (1980) define adesivo como um material que, quando aplicado a um substrato, juntá-lo a outro e resistir a separação. O contato entre superfícies é obtido pelo processo de molhamento, ou seja, o adesivo em estado fluido deve ter capacidade de se espalhar pela superfície do substrato. O processo de molhamento envolve o equilíbrio entre as fases quando estas são colocados em contato e a cinética entre as tensões interfaciais para criação de uma nova área interfacial (COSTA, 2014).

Estruturas em geral, quando solicitadas por esforços ativos, têm seus elementos estruturais resistindo de formas diferentes com relação a essas solicitações. A Figura 17 mostra o formato das linhas de ruptura de estruturas submetidas a esforços axiais.

Figura 17 - Ruptura de elementos estruturais de concreto sob ação de carregamento axial (a) por fendilhamento; (b) por cisalhamento oblíquo; (c) mista entre as situações (a) e (b); (d) por flexão (momento fletor de pórtico, flambagem ou excentricidade de carga e (e) por flambagem das armaduras longitudinais.



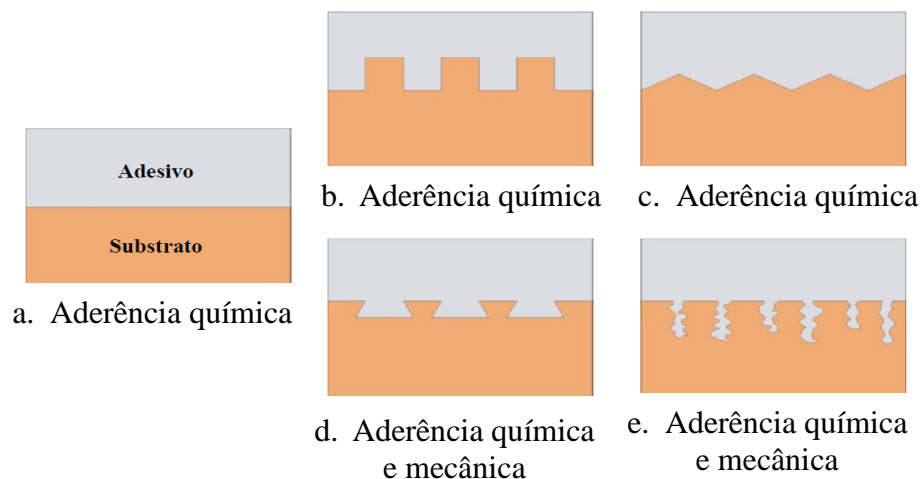
Fonte: RED REHABILITAR (2003).

Ao surgimento destas manifestações patológicas, a superfície de contato do reparo com o substrato segue estas linhas de ruptura, portanto pode-se dizer que a interface entre reparo e substrato está sujeita a estes mesmos esforços e deve ter resistência de aderência suficiente para absorvê-los e o material de reparo deve, da mesma forma, ter resistência suficiente para resistir sem ruptura. Sempre que os requisitos de desempenho conceitual, funcional ou técnico alterarem a composição da argamassa, o seu impacto sobre a compatibilidade do sistema precisa ser estudado (SCHUEREMANS *et al*, 2011).

O mecanismo de aderência em reparos estruturais está relacionado com as forças químicas que são responsáveis pela ancoragem entre a matriz reativa do material novo e o substrato de concreto. Esta ancoragem é fornecida pela formação de estruturas silico-calcário-hidratadas da matriz que penetra nos poros do substrato (RASHID *et al*, 2015). Para Costa (2014) a intensidade dessas ligações está diretamente relacionada ao contato substrato-matriz, sendo este influenciado pelas características superficiais do substrato, topografia (rugosidade e porosidade) e presença de contaminantes, pelas características reológicas e geométricas da matriz cimentícia, pela energia de aplicação da matriz sobre o substrato e pelas condições ambientais.

Costa (2014) trata o mecanismo de aderência dividindo-o em dois grandes grupos: aderência química e mecânica. O primeiro grupo trata da natureza de aderência predominantemente resultante das ações de atração moleculares entre fases (primárias – iônicas, covalentes e metálicas e secundárias – forças intermoleculares). Já segundo grupo refere-se à influência da estrutura física das superfícies (rugosidade e porosidade) que exerce a função de ancoragem após a solidificação dos meios. A Figura 18 exemplifica os mecanismos de aderência que podem ocorrer em uma ligação entre dois materiais.

Figura 18 - Representação dos mecanismos de aderência químicos e mecânicos entre adesivo e substrato.



Fonte: COSTA (2014).

Nota-se que a aderência química está sempre presente em mecanismos de aderência, enquanto a aderência mecânica aparece em alguns modelos que têm o substrato favorável a este fator, caso o substrato apresente porosidade ou rugosidade suficiente para permitir penetração e ancoragem mais fortes da matriz. A penetração de partículas nos poros do substrato depende

da relação entre o diâmetro do poro e das partículas presentes na matriz, considerando as alterações destas após a mistura e cinética de hidratação do ligante (COSTA, 2014).

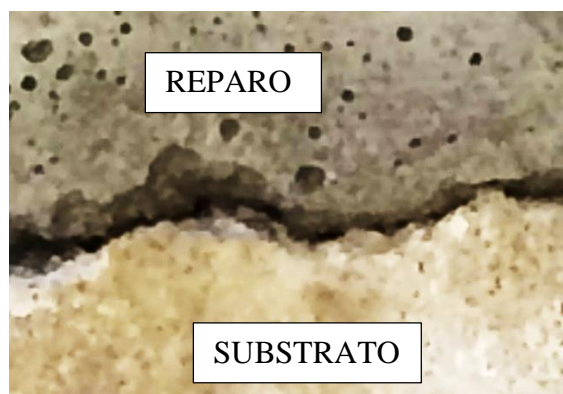
A zona de transição é o elo mais frágil em um sistema de reparo e quando sob carga, a fratura tende a ocorrer nesta região, independentemente das condições de temperatura e umidade (RASHID *et al*, 2015). A hidratação do cimento e a microestrutura têm influência significativa na resistência de aderência. A perda de água na matriz, decorrente da absorção pelo substrato, resulta em redução da porosidade e, conseqüentemente maior resistência de aderência na interface (ZHOU, YE e BREUGEL, 2016).

2.3.2. Influência das propriedades reológicas na aderência de materiais cimentícios

Para que se desenvolva aderência entre matrizes cimentícias no reparo endurecido, é necessário que haja adesão inicial adequada quando a matriz é aplicada em estado fresco. Para que isto ocorra, a matriz deve recobrir toda a superfície do substrato, devendo apresentar características reológicas, empacotamento e distribuição das partículas da matriz adequadas às características superficiais do substrato (COSTA, 2014).

Argamassas de reparo devem, assim como outros tipos de argamassas, ser aplicadas em um estado plástico de deformações. Aquelas que não possuírem esta característica reológica tendem a apresentar problemas de desempenho pelos mesmos motivos das argamassas de revestimento. Caso esta situação de compatibilidade não ocorra, há o surgimento de defeitos interfaciais na zona de transição entre substrato e matriz, causando perda na capacidade de aderência (Figura 19).

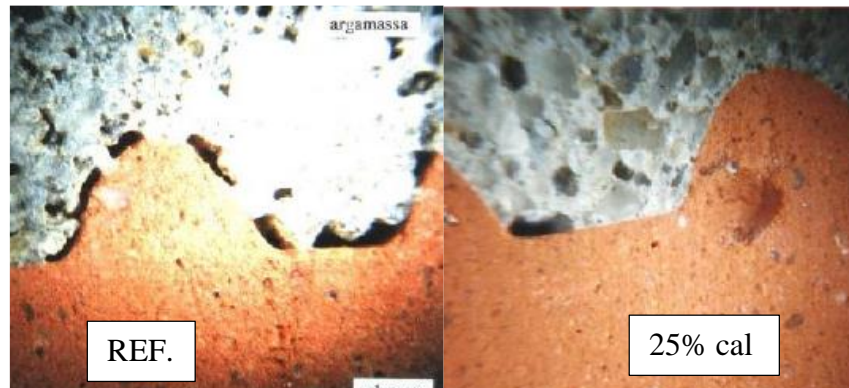
Figura 19 - Defeito interfacial no contato entre reparo e substrato de concreto.



Fonte: O autor (2017).

O efeito do empacotamento de partículas na extensão de aderência pode ser visualizado na Figura 20. Carasek (1996) adicionou 25% de cal em relação à massa de cimento de uma argamassa de revestimento de paredes de traço 1:3 e obteve como resultado um notável ganho de extensão de aderência nos sulcos de um bloco cerâmico.

Figura 20 - Efeito da adição de cal na extensão de aderência de argamassa de revestimento

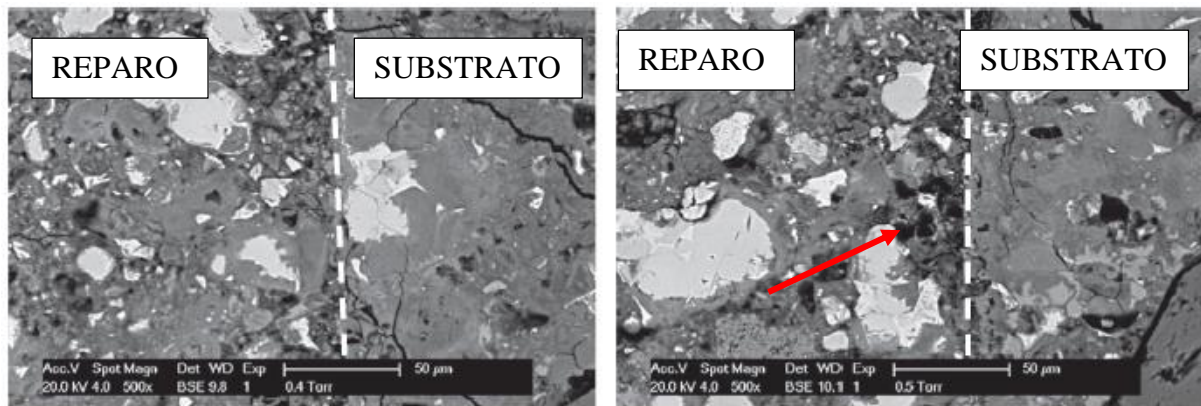


Fonte: CARASEK (1996).

Aliche e Mallat (2011) mostraram que a rugosidade e as condições de umidade da superfície de contato do substrato influenciam significativamente na aderência e que uma argamassa calcária com fibras se mostra menos sensível a estas condições.

Os fabricantes de argamassas de reparo industrializadas orientam a utilização de água como ponte de aderência para seus produtos antes da aplicação. Zhou, Ye e Breugel (2016) chamam a atenção para a questão da saturação do substrato ao aplicar a matriz reparadora. Quando o substrato está saturado, ele fornece água adicional para a hidratação do cimento do material de reparo. Isto acelera a hidratação do cimento e leva a uma microestrutura da matriz mais porosa – o substrato de concreto funciona como um “reservatório de água” para o avanço da hidratação do cimento. A Figura 21, obtida através de elétrons de retrodifusão luminosa (BSE), apresenta o efeito da saturação do substrato no resultado da matriz hidratada. À direita (substrato saturado) nota-se a maior incidência e maior diâmetro de poros na interface do sistema em relação à imagem da esquerda (substrato não-saturado).

Figura 21 - Efeito da saturação do substrato na hidratação da matriz.



Fonte: ZHOU, YE e BREUGEL (2016).

O estudo de Zhou, Ye e Breugel (2016) levantou que a relação água/cimento na zona de transição em um substrato saturado ficou 53% maior que no restante da matriz, além da porosidade nesta área apresentar aumento de 83% com relação ao restante da matriz. Portanto, deve-se realizar a aplicação de água no substrato para limpar a região e saturar apenas a superfície a ser reparada, evitando encharcamento da área.

2.4.CONCEITOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS

2.4.1. Conceituação geral

Reologia é a ciência que estuda a fluidez e a deformação da matéria, avaliando as relações entre tensão de cisalhamento e deformação em determinado período de tempo (GLATTHOR E SCHWEIZER, 1994). Pode-se dizer que o comportamento reológico de um material qualquer é a relação entre um determinado esforço ao qual este é submetido e o seu fluxo de deslocamento (CARDOSO, 2009).

Chama-se viscosidade o valor da constante que relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação, que pode ser extraída da equação (3).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento;

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação;

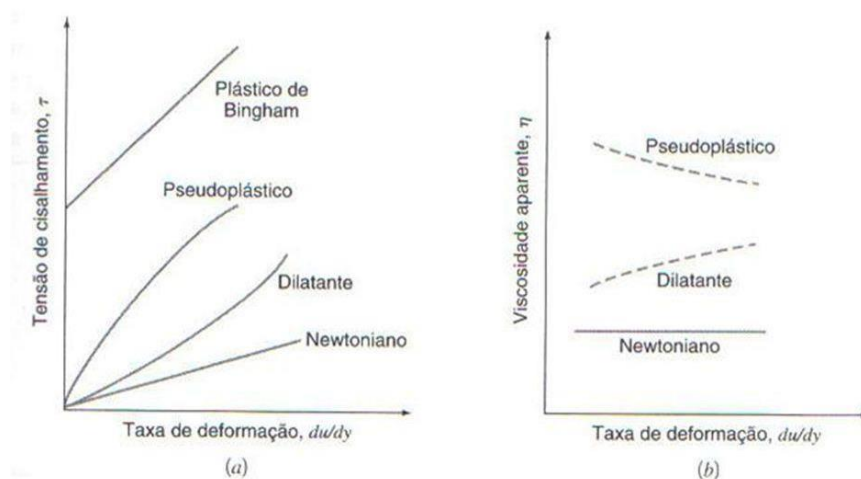
η = viscosidade do material.

Cardoso (2009) cita que para materiais particulados – e entre eles as argamassas – a alta concentração de partículas causa um desvio do modelo de fluido newtoniano devido à grande interação entre as mesmas, o que resulta em um comportamento reológico onde a viscosidade é variável e o modelo é não linear. Dentre estes modelos, estão os fluidos de Bingham⁷:

- Materiais pseudoplásticos – apresentam redução da viscosidade com o aumento da taxa ou da tensão de cisalhamento;
- Materiais dilatantes – apresentam aumento da viscosidade em função do aumento da taxa ou da tensão de cisalhamento.

Os efeitos da taxa de deformação sobre a viscosidade de um fluido podem ser expressos graficamente a partir dos diagramas reológicos da Figura 22.

Figura 22 - Diagramas reológicos de fluidos.



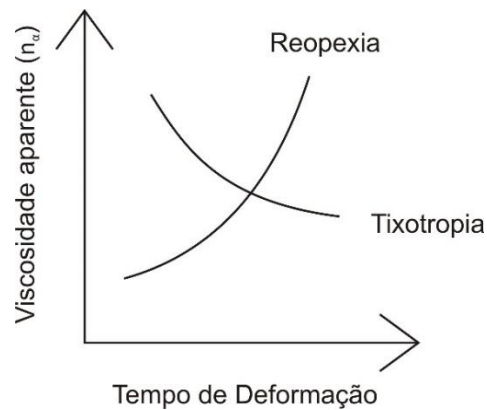
Fonte: FOX, PRITCHARD e McDONALD (2009).

Cardoso (2009) ainda cita que o comportamento dos materiais pode depender do tempo e história de cisalhamento, apresentando as seguintes características, graficamente mostradas na Figura 23:

- Tixotropia – Redução da viscosidade sob cisalhamento constante;
- Reopexia – Aumento da viscosidade sob cisalhamento constante.

⁷ Eugene Cook Bingham, professor do Departamento de Química da Universidade de Lafayette (EUA). Homenageado pelos seus esforços no campo de estudo da Reologia.

Figura 23 - Efeito do tempo e história do cisalhamento na viscosidade do fluido.



Fonte: O autor (2016).

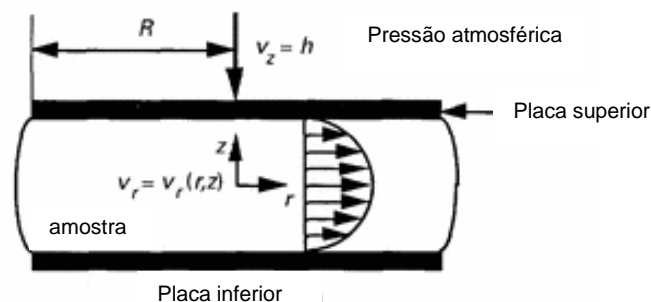
Costa, Cincotto e Pileggi (2005) citam que do ponto de vista reológico, a viscosidade da argamassa está relacionada com a facilidade de escoamento do fluido, determinando a facilidade de seu espalhamento e penetração nas rugosidades do substrato. O preenchimento das mesmas fortalece o fenômeno mecânico de ancoragem da argamassa e, conseqüentemente, a resistência de aderência da interface.

2.4.2. Caracterização reológica por ensaio de *squeeze-flow*

Esta é uma técnica de uso multidisciplinar de avaliação de pastas, podendo se tratar de produtos cosméticos, alimentos, cerâmica, entre outros.

Sua aplicação em pasta cimentícia teve como início o estudo de Min, Erwin e Jennings (1994) e seu princípio básico foi representado pelos autores conforme Figura 24.

Figura 24 - Modelo esquemático do ensaio de *squeeze-flow*.



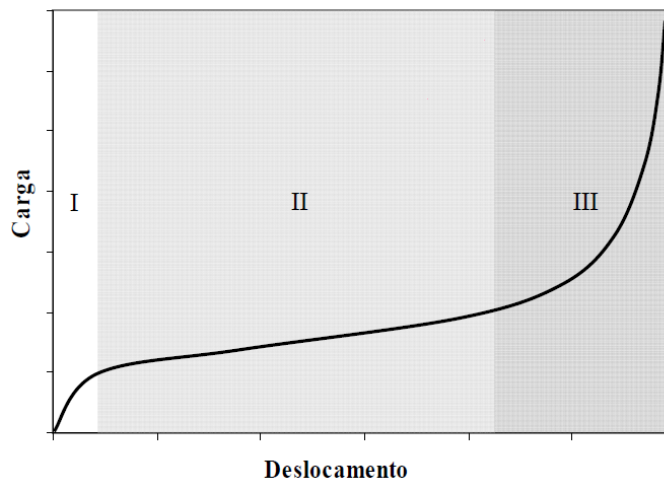
Fonte: MIN, ERWIN e JENNINGS (1994).

Romano (2013) explica que a avaliação do comportamento reológico por *squeeze flow* consiste na compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, possibilitando analisar com precisão materiais em ampla faixa de consistência e em velocidades ou grau de deformação variáveis.

Cardoso (2009) cita que para uma avaliação confiável de argamassas pelo ensaio de *squeeze flow*, devem ser levados em consideração as variáveis experimentais do teste, como as ferramentas utilizadas, o procedimento de moldagem, os materiais utilizados e a interpretação dos resultados para as situações práticas.

O ensaio apresenta como resultado a carga de compressão em função do deslocamento, possibilitando a análise do comportamento de espalhamento do material sobre um substrato. Min, Erwin e Jennings (1994) apresentam a curva teórica de um ensaio de *squeeze flow* (Figura 25).

Figura 25 - Curva teórica de ensaio de *squeeze-flow*.



Fonte: MIN, ERWIN e JENNINGS (1994).

Cardoso, Pileggi e John (2005) explicam os três estágios da curva carga x deslocamento:

- I. Pequeno deslocamento (deformação elástica) - o material comporta-se como sólido, apresentando deformação elástica linear. Uma argamassa que apresente comportamento significativo nesse estágio pode apresentar problemas de fissuração ainda no estado fresco devido à recuperação elástica após a retirada do esforço;
- II. Deslocamento intermediário (deformação plástica e/ou fluxo viscoso) - a compressão resulta em deformação radial elongacional e de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, e assim, o mesmo flui por deformação plástica e/ou

viscosa dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, o que aparenta ser um comportamento apropriado para aplicação e espalhamento de argamassas;

- III. Grande deslocamento - (*strain hardening*, entrelaçamento ou embricamento) - o material é submetido a grandes deformações, pode ocorrer um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para o deslocamento do mesmo. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema (fibras por exemplo) submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo devido à maior interação das unidades móveis. Este é um estágio de comportamento em que procedimentos de aplicação e acabamento do material devem ser dificultados, devido às altas cargas necessárias para deformá-lo, possivelmente levando a um acabamento defeituoso.

A análise de *squeeze-flow* em termos de carga e deslocamento proporciona informação útil sobre as características de fluxo de determinado material quando submetido a diferentes solicitações. No entanto, a técnica permite a determinação de parâmetros reológicos tais como viscosidade, tensão de escoamento e a determinação da taxa de deformação que o material é submetido (CARDOSO, JOHN e PILEGGI, 2009).

Segundo Cardoso, John e Pileggi (2009) para determinação da viscosidade, deve-se assumir se o modelo tem característica deslizante (viscosidade elongacional) ou confinado (viscosidade cisalhante). Assumindo a condição deslizante, com a utilização de placas metálicas polidas no ensaio, determinar-se-á a viscosidade elongacional biaxial do material. O modelo de cálculo segue o proposto por Steffe (1996)⁸ *apud* Cardoso, John e Pileggi (2009).

Durante o ensaio de *squeeze-flow* realizado a uma velocidade constante, a amostra sofre variação linear de espessura. Da equação geral da cinemática (4):

$$h = h_0 - vt \quad (4)$$

Onde h é a altura da amostra no instante t , h_0 é a altura inicial da amostra, v a velocidade do ensaio e t o tempo passado desde o início do teste.

A taxa de deformação elongacional biaxial (ε_B) – equação (5) – corresponde à metade da taxa de deformação vertical de Hencky⁹ (ε_H):

⁸ Steffe, J.F. Rheological methods in food process engineering, Freeman Press: EUA, 1996.

⁹ Heinrich Hencky, engenheiro civil alemão. Este modelo foi proposto por Hencky, em 1938 com a finalidade de modelar borrachas vulcanizadas.

$$\varepsilon_B = \frac{\varepsilon_H}{2} = \frac{v}{2h} \quad (5)$$

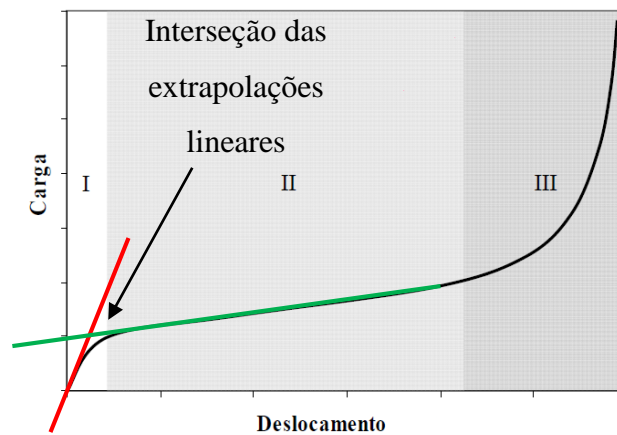
A viscosidade elongacional (η_B) é definida como a razão entre a tensão elongacional biaxial (σ_B), que por sua vez é a razão entre a carga de compressão e a área da placa de topo, e a taxa de deformação elongacional (equação 6):

$$\eta_B = \frac{\sigma_B}{\dot{\varepsilon}_B} = 2P \frac{h_0 - vt}{v\pi R^2} \quad (6)$$

Onde P é a carga aplicada na amostra para determinado tempo e R o raio da amostra circular.

A tensão de escoamento, como citam Cardoso, John e Pileggi (2009) é uma variável de resposta direta de ensaios de reometria. Porém é possível realizar a determinação indireta da tensão de escoamento por extrapolação da curva de resultado de ensaio de *squeeze-flow* (carga x deslocamento, Figura 25). O ponto de transição da fase I (deformação elástica linear) para a fase II (deformação plástica ou fluxo viscoso) pode ser considerado o valor do escoamento para o ensaio. A tensão é calculada dividindo a carga de compressão equivalente da interseção das extrapolações lineares das curvas das fases I e II pela área da placa superior (Figura 26).

Figura 26 - Método gráfico de determinação da tensão de escoamento de fluido através de ensaio de *squeeze-flow*.



Fonte: Adaptado de CARDOSO, JOHN e PILEGGI (2009)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. APRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO

Este é um trabalho fundamentalmente experimental, cujo objetivo é estudar variações de fatores de constituição de diferentes argamassas em experimentos de laboratório, a fim de determinar a resposta do comportamento da aderência entre argamassa de reparo e substrato de concreto.

As unidades analisadas no experimento foram:

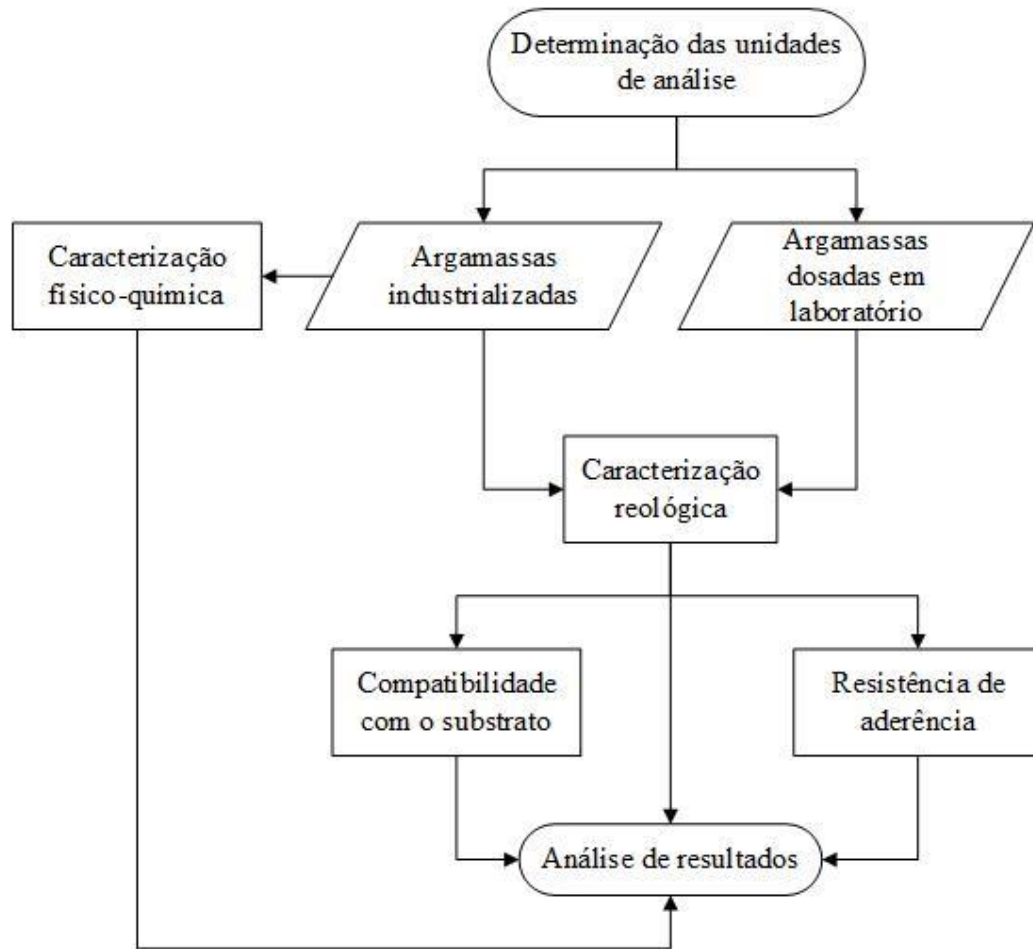
- a) Argamassas de reparo industrializadas;
- b) Argamassas dosadas em laboratório com formulações características para utilização em reparos de estruturas de concreto.

O estudo consiste basicamente nas seguintes partes:

- Caracterização das argamassas industrializadas quanto às suas propriedades físico-químicas, no que diz respeito à composição e identificação dos componentes;
- Avaliação do comportamento reológico das argamassas industrializadas e dosadas em laboratório;
- Avaliação do desempenho mecânico e de retração das argamassas em estado endurecido;
- Avaliação da resistência de aderência da matriz com o substrato;
- Análise dos resultados e avaliação da influência do comportamento reológico nos estudos de resistência de aderência.
- Análise microscópica da interface de contato entre matriz e substrato.

A Figura 27 apresenta a organização do programa experimental, esquematizando os ensaios realizados para cada parte do programa. Os itens a seguir deste capítulo apresentam o projeto experimental com a descrição dos materiais, a definição das variáveis de estudo e os métodos e equipamentos para sua determinação.

Figura 27 - Fluxograma das fases do programa experimental.



Fonte: O autor (2016).

Os resultados dos ensaios são correlacionados entre si para a demonstração de influências entre os comportamentos de cada amostra. Foram realizadas análises qualitativas e quantitativas com relação aos resultados do comportamento reológico, visando também a obtenção das grandezas viscosidade elongacional, taxa de deformação biaxial e tensão de cisalhamento, além da tensão de escoamento e, conseqüente influência na resistência de aderência.

Além disso, foi estudado e discutido através dos ensaios complementares outras importantes propriedades das argamassas de reparo, como resistência mecânica, densidades no estado fresco e endurecido, bem como a análise mineral e granulométrica, buscando-se relações com o comportamento reológico e com a aderência ao substrato de concreto.

3.2.DESCRICÃO DOS MATERIAIS

3.2.1. Argamassas industrializadas

Foram escolhidas cinco (5) argamassas industrializadas de diferentes fabricantes que, segundo seus representantes comerciais, são as mais utilizadas em reparos estruturais de obras de concreto armado comuns na região de Curitiba, Paraná. Estas foram nomeadas genericamente como AI-1, AI-2, AI-3, AI-4 e AI-5. A Figura 28 apresenta imagem das argamassas industrializadas no seu estado anidro, enquanto que o Quadro 5 apresenta a relação líquido/materiais secos indicada pelos fabricantes (pois, conforme mostrado no próprio quadro, há argamassas que não utilizam água para mistura, mas um líquido desenvolvido pelo próprio fabricante) para cada uma das argamassas. Todas as argamassas escolhidas, de acordo com os catálogos dos fabricantes, são de base cimentícia modificadas com polímeros, algumas reforçadas com fibras (Quadro 5).

Figura 28 - Apresentação visual das argamassas industrializadas: (a) AI-1 (b) AI-2 (c) AI-3 (d) AI-4 (e) AI-5



Fonte: O autor (2016).

Quadro 5 – Identificação das argamassas industrializadas utilizadas no estudo.

Argamassa	Relação líquido/mat. Secos (fabricante)	Tipo de líquido	Presença de fibras
AI-1	0,1450	Água	Sim
AI-2	0,1625	Água	Sim
AI-3	0,1248	Componente B	Não
AI-4	0,1300	Água	Não
AI-5	0,1470	Componente A	Sim

Fonte: O autor (2016).

3.2.2. Argamassas dosadas em laboratório

As argamassas preparadas em laboratório foram formuladas de acordo com o proposto no Quadro 6.

Quadro 6 - Características das argamassas dosadas em laboratório

Denominação	Tipo	Traço (em massa)	Adição (em massa de cimento)	Relação água/cimento	Relação água/materiais secos	Aditivo SP
AD-R	Referência	1:3	-	0,4	0,1	0,5%
AD-EVA	Modificada com polímero	1:3	EVA (10%)	0,4	0,1	0,5%
AD-SA	Modificada com pozolana	1:3	Sílica ativa (10%)	0,4	0,1	0,5%

Fonte: O autor (2016).

3.2.2.1. Definição das formulações

As formulações das argamassas foram baseadas em estudos de Medeiros (2002), Barluenga e Hernandez-Olivares (2004) e Medeiros, Helene e Selmo (2009). A proporção do aditivo superplastificante (SP) respeita a faixa indicada pelo fabricante e foi definida a partir de observação empírica de consistência adequada da argamassa no que diz respeito à fluidez e aplicabilidade.

3.2.2.2. Caracterização do cimento

O cimento utilizado para o estudo é do tipo CP V-ARI, que por apresentar alta resistência inicial, é o cimento mais adequado para utilização em reparo estrutural. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e química do cimento utilizado nas amostras fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2 - Ensaio de caracterização do cimento CPV-ARI das argamassas de laboratório.

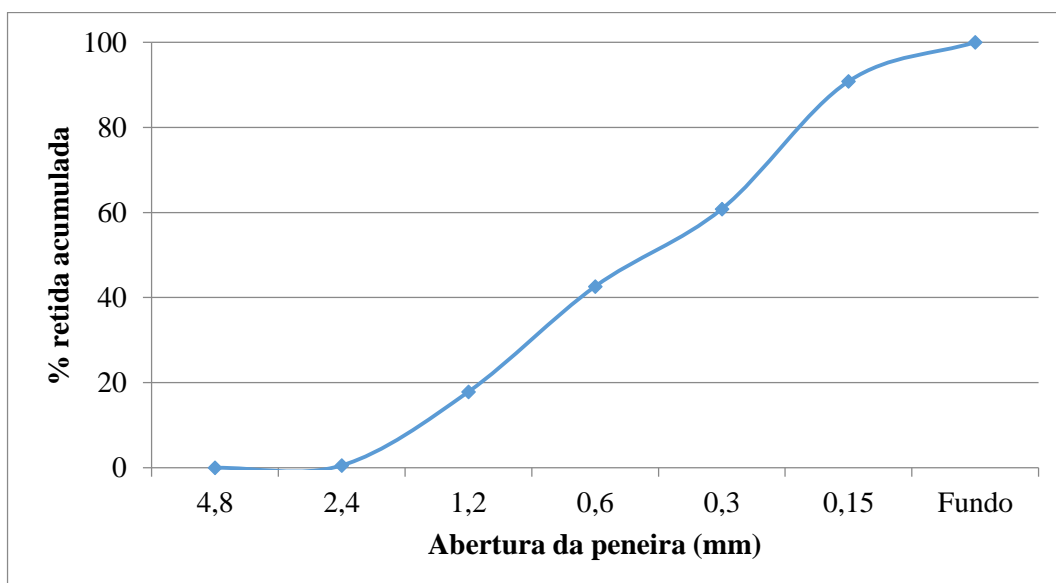
Caracterização química									
Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda ao fogo (%)	CaO livre (%)	Resid. Insol. (%)	Equiv. alcalino (%)
4,24	18,87	2,72	60,73	4,16	3,00	3,35	0,65	0,84	0,71
Caracterização física									
Início de pega (h:mm)	Fim de pega (h:mm)	Massa esp. (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	Resistência à compressão (MPa)			
						1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
3:41	4:18	3,09	4390	0,03	0,34	22,3	39,7	45,0	52,9

Fonte: Fabricante (2016).

3.2.2.3. Caracterização do agregado

O agregado miúdo é formado por areia natural quartzosa de massa específica igual a 2,62 g/cm³ e massa unitária de 1,43 g/cm³. A Figura 29 apresenta a curva granulométrica da areia utilizada e, segundo o resultado da curva, trata-se de uma areia bem graduada.

Figura 29 - Curva granulométrica da areia das argamassas dosadas em laboratório.



Fonte: O autor (2016).

3.2.2.4. Caracterização das adições e aditivo.

O polímero etil vinil acrilato utilizado neste estudo é fornecido em formato de pó dispersível em água. A sílica ativa utilizada neste estudo é composta, segundo o fabricante, por sílica amorfa e cristalina, óxidos de ferro, cálcio, alumínio, magnésio, sódio e potássio, além de uma fração de carbono. O aditivo superplastificante utilizado tem apresentação em pó, e é composto, segundo o fabricante, por éter policarboxílico modificado. Foi definida a dosagem de 0,5% em massa de cimento através da verificação da consistência da argamassa de referência ao atingir comportamento semelhante à apresentada na Figura 9.

3.2.2.5. Preparo das argamassas

A padronização do preparo das argamassas dosadas foi definida traçando três etapas distintas:

- a. Mistura e homogeneização da fração sólida: após a separação e a pesagem dos materiais, a fração sólida (cimento, areia e adição, no caso de AD-EVA e AD-SA) é misturada em argamassadeira por cerca de 5 minutos em velocidade lenta;
- b. Adição de água: após a homogeneização do material sólido, houve o acréscimo de água e a mistura continuou sendo processada em velocidade lenta por cinco (5) minutos;
- c. Após a homogeneização da argamassa, avaliou-se a consistência e ajusta-se o teor de aditivo superplastificante para a obtenção de consistência adequada a este tipo de trabalho, que, no caso, ficou definida em 0,5% da massa de cimento.

3.2.3. Substrato de concreto

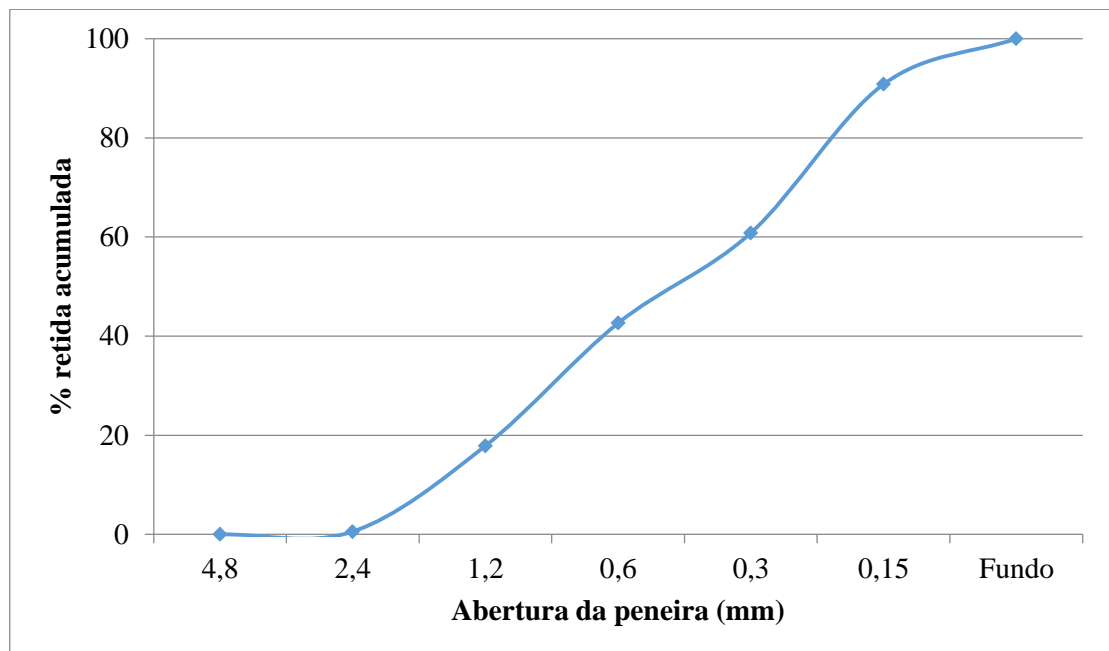
O substrato de concreto foi moldado com um traço 1 : 2,17 : 2,94 (cimento : areia : brita) em massa, com relação água/cimento de 0,60 e teor de argamassa de 51%, para uma resistência característica de 25 MPa aos 28 dias, tendo obtido resistências finais conforme ensaios apresentados no apêndice A.

O cimento utilizado para sua confecção foi o CPII-F 32 (Tabela 3), o agregado miúdo utilizado de origem natural (o mesmo utilizado nas argamassas dosadas em laboratório - Figura 30) e o agregado graúdo pedrisco, de dimensão máxima característica 9,5 mm, que permite que o concreto possa ser adequadamente moldado em formas prismáticas de 40x40x160 milímetros.

Tabela 3 - Ensaios de caracterização do cimento CII-F 32 do substrato.

Caracterização química									
Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda ao fogo (%)	CaO livre (%)	Resid. Insol. (%)	Equiv. alcalino (%)
4,31	18,64	2,68	60,72	4,12	2,70	5,12	0,54	1,62	0,71
Caracterização física									
Início de pega (h:mm)	Fim de pega (h:mm)	Massa esp. (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	Resistência à compressão (MPa)			
						1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
4:20	5:05	3,08	3,30	2,08	12,54	12,6	28,0	34,2	41,9

Fonte: Fabricante (2016).

Figura 30 - Curva granulométrica da areia do substrato de concreto.

Fonte: O autor (2016).

3.3.MÉTODOS DE ANÁLISE E EQUIPAMENTOS

Cada amostra de argamassa industrializada passou por dezessete (18) ensaios, sendo que alguns foram realizados de forma conjunta. As argamassas dosadas em laboratório não passaram por testes de caracterização física – com exceção das massas unitária e específica – por possuírem seus componentes conhecidos na dosagem, tendo sido passadas por treze (14) ensaios. Os laboratórios onde foram realizados cada um deles estão relacionados no Quadro 7.

Quadro 7 - Relação de ensaios e laboratórios participantes do programa experimental.

Estudo	Ensaio	Laboratório
Caracterização físico-química	Difratometria de Raios-X (DRX);	Laboratório de Óptica de Raios X e Instrumentação (LORXI – UFPR)
	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX);	Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR – UFPR)
	Granulometria (NBR 7217:1987)	Laboratório Didático de Materiais (UFPR)
	Granulometria a laser	Centro Técnico da Votorantim Cimentos
	Massa unitária e massa específica	Laboratório Didático de Materiais (UFPR)
Caracterização Reológica	Densidade e teor de ar incorporado (NBR 13278:2005)	Laboratório de Tecnologia de Argamassas (LATECA – UFPR)
	<i>Squeeze-flow</i> (NBR 15839:2010)	
	<i>Flow-table</i> (NBR 13276:2002)	
Desempenho no estado endurecido	Resistência à tração (NBR 13279:2005)	
	Resistência à compressão (NBR 13279:2005)	
	Módulo de elasticidade (NBR 15630:2008)	
	Densidade (NBR 13280:2005)	
	Variação dimensional (NBR 15261:2005)	
Resistência de aderência	Aderência à tração direta	
	Aderência à tração na flexão	
	Aderência ao cisalhamento direto	
	Aderência ao cisalhamento oblíquo	
Microscopia da interface	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Centro de Microscopia Eletrônica (CME – UFPR)

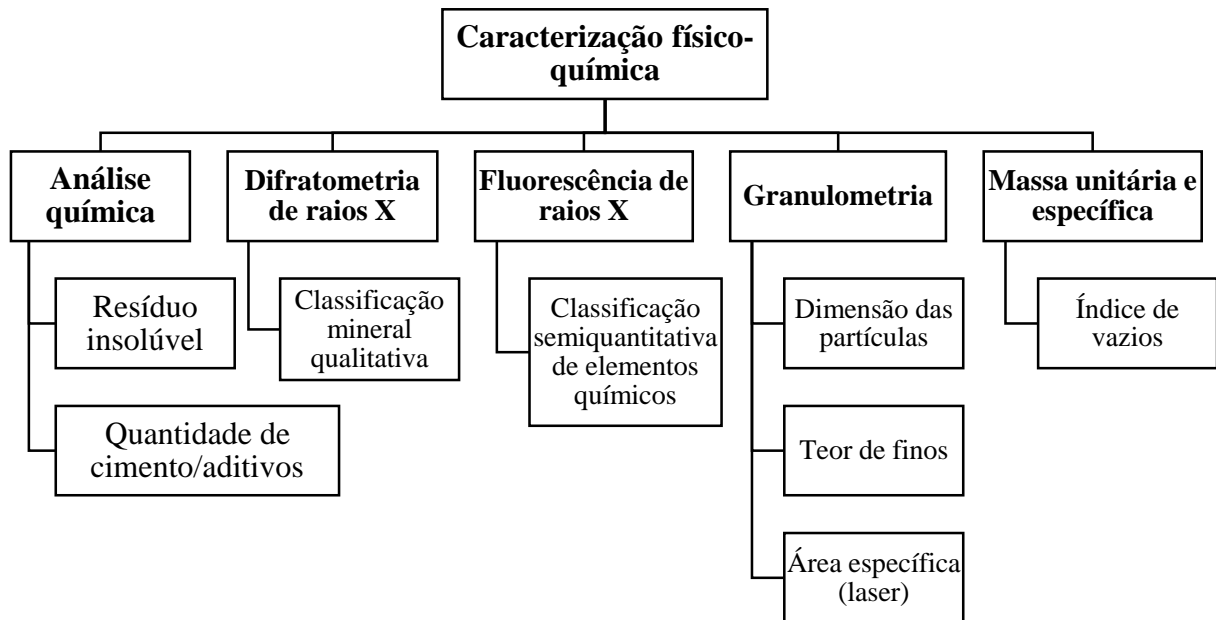
Fonte: O autor (2016).

3.3.1. Ensaios de caracterização físico-química

Os ensaios de caracterização físico-química são voltados ao estudo das argamassas industrializadas, com o propósito de analisar a composição dos produtos disponíveis no

mercado da construção civil. A Figura 31 apresenta o organograma dos ensaios realizados e as respostas a obtidas de cada uma das técnicas empregadas.

Figura 31 - Técnicas aplicadas para caracterização física das argamassas industrializadas



Fonte: O autor (2016).

3.3.1.1. Análise química

A realização de análise química nas amostras industrializadas permite a obtenção dos teores de cimento e aditivos das argamassas ao separar destes elementos a fração de resíduo insolúvel sob ataque ácido.

O andamento deste ensaio obedece o proposto por Quarcioni (1998), e leva em conta três frações distintas da argamassa, conforme Quadro 8.

Quadro 8 - Análise fracionada de argamassas

Fração	Elementos	Determinação
Volátil	Umidade	Secagem
Insolúvel	Agregados e fíler	Resíduo insolúvel
Solúvel	Aglomerantes e aditivos	Ataque ácido

Fonte: O autor (2016).

Ao submeter a amostra de argamassa ao ataque de ácido clorídrico, a fração solúvel é consumida. Após lavagem e filtragem da fração insolúvel, a diferença de massa entre a amostra inicial e o resíduo insolúvel é a incidência de componentes solúveis na argamassa.

Deve-se levar em conta a adição de sílica nas amostras, como chama a atenção Quarcioni *et al* (1997). O uso de um cimento com adições minerais, que se solubilizam total ou parcialmente ao ataque ácido, faz com que a presença de sílica na fração solúvel passe a ser proveniente não somente do clínquer, mas também das adições minerais. Desta forma, a análise deve superestimar a quantidade de cimento empregada no traço.

O procedimento para este ensaio se dá através da seguinte sequência:

- a) Secagem da amostra – amostra 24 horas em estufa a 100°C;
- b) Pesagem da amostra seca – fixado de 100 gramas de amostra seca para cada argamassa;
- c) Pesagem do ácido solvente – utilizado no ensaio ácido clorídrico;
- d) Homogeneização do pó com o ácido;
- e) Filtração e lavagem com carbonato de sódio;
- f) Pesagem do material filtrado.

3.3.1.2. Ensaio de difratometria de raios X

A difratometria de raios X é uma técnica de caracterização da microestrutura de materiais cristalinos e permite a identificação de tipos de minerais presentes nestes materiais através da maneira como os raios são difratados. Os feixes de raios x de comprimento de onda conhecidos são lançados em uma amostra de determinado material, que, para cada formato de cristal de cada mineral, difrata o raio a um determinado ângulo.

A lei de Bragg, que descreve o fenômeno da difração, é representada pela equação (7):

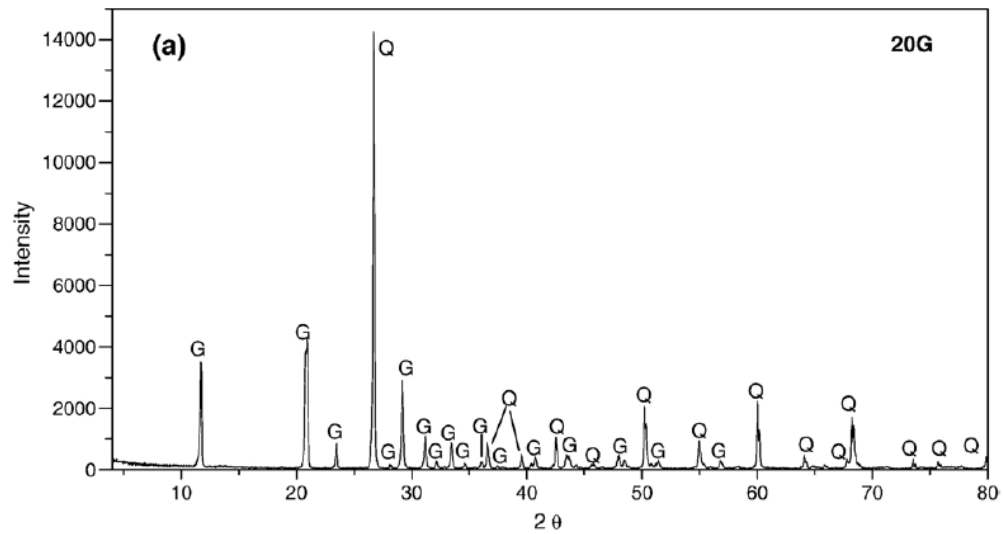
$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (7)$$

Onde:

- λ = comprimento de onda do feixe de raio que incide no cristal;
- d = distância entre planos de da rede de átomos de um cristal;
- θ = ângulo de difração do feixe de raio;
- n = ordem de difração.

Os dados são interpretados em gráficos através de picos, sendo que cada pico representa a presença de determinado cristal. A Figura 32 ilustra esta representação para uma argamassa de reparo com 20% de adição de gesso na composição.

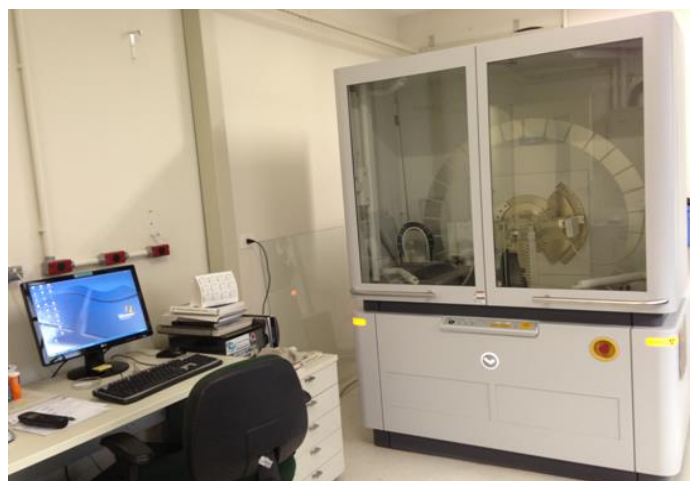
Figura 32 - DRX de argamassa de reparo



Fonte: MARQUES et al (2005).

O ensaio de DRX foi realizado no Laboratório de Óptica de Raios X e Instrumentação da UFPR, com a difração feita através do difratômetro D8 Advance da marca Brucker. Os parâmetros de medição foram definidos como: onda de $1,5406\text{\AA}$, com passo a cada $0,041^\circ$ e 1956 pontos, sendo 76 segundos por ponto. A abertura do detector é de $2,947^\circ$, com 30 rotações por minuto. A tensão é de 40kV gerando corrente de 20mA. A abrangência da varredura é de 10° a 90° a cada 2θ . O equipamento de difração de raios X está apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Equipamento utilizado na difração de raios X.



Fonte: O autor (2016).

3.3.1.3. Ensaio de fluorescência de raios X

A espectrometria de fluorescência de raios X é uma técnica capaz de determinar a composição de materiais sólidos. A técnica consiste em expor uma amostra a um feixe de radiação que, quando excitada, faz com que cada elemento de maior peso atômico que o flúor presente emita radiação fluorescente característica. No caso das argamassas, os minerais que a compõem emitem uma radiação com comprimentos de onda característicos de cada elemento quando excitados por fonte primária de radiação. Através da medida do comprimento de onda resultante, pode-se identificar os minerais e, admitindo que a intensidade da fluorescência dos raios X é diretamente proporcional à concentração de cada um desses elementos, pode-se estimar um resultado quantitativo.

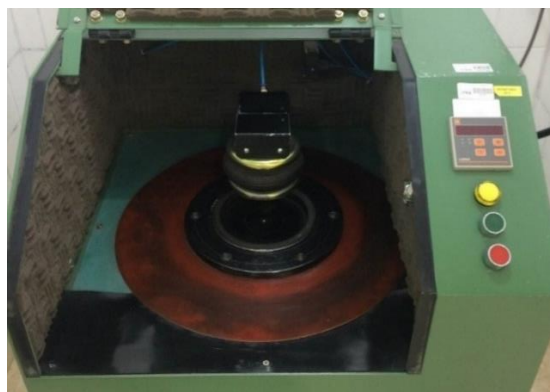
O ensaio de FRX foi realizado no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR. O preparo das amostras se inicia com a moagem do material que, confinado em uma panela de carbeto de tungstênio (Figura 34), é submetido a ciclos de vibração durante 30 segundos em um moinho de eixo vertical que trava pneumaticamente a panela (Figura 35). Ao fim da moagem, o material é reduzido a um pó passante na peneira com abertura de 0,044 mm.

Figura 34 - Panela de carbeto de tungstênio para moagem do material.



Fonte: O autor (2016).

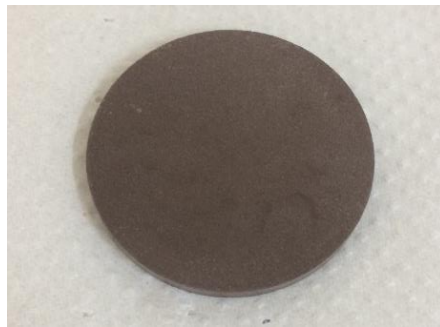
Figura 35 - Moinho de eixo vertical.



Fonte: O autor (2016).

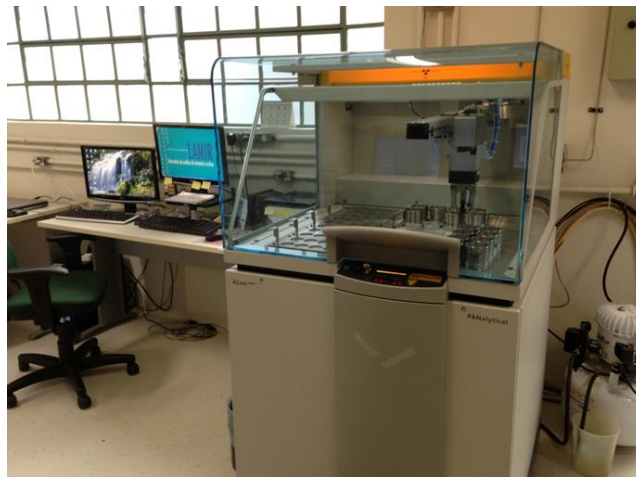
Após o processo de moagem, o material é submetido à prensagem de 7 gramas da amostra com 1,4 gramas de cera, formando a pastilha a ser submetida ao ensaio (Figura 36). Esta pastilha é, então, submetida ao ensaio através da emissão de feixes de raios X por tubo de ródio no equipamento Panalytical Axios Max, da Figura 37. A técnica semi quantitativa aplicada permite a identificação de elementos presentes nas amostras em quantidade superior a 0,1%.

Figura 36 - Pastilha prensada para análise de fluorescência de raios X.



Fonte: O autor (2016).

Figura 37 - Equipamento utilizado na análise de fluorescência de raios X.



Fonte: O autor (2016).

3.3.1.4. Granulometria

A granulometria do agregado tem impacto considerável sobre o estado fresco de materiais cimentícios (ROMANO, TORRES E PILEGGI, 2015). Segundo Cardoso (2009) os maiores empacotamentos dos agregados ocorrem nas distribuições mais abertas, com maior extensão granulométrica e vários diâmetros de partículas, resultando em baixas porosidades. O melhor empacotamento permite aproveitamento mais efetivo da pasta sem comprometimento

das características reológicas, reduz permeabilidade e dificulta a separação de fases (CARDOSO, 2009).

Arnold e Kazmierczak (2009) citam que para uma determinada consistência de argamassa, na medida em que o módulo de finura do agregado aumenta a plasticidade da argamassa medida por *squeeze-flow* diminui, assim como o teor de ar incorporado e o coeficiente de capilaridade. Em contrapartida, há aumento na resistência à compressão, na densidade de massa aparente no estado fresco e no módulo de elasticidade dinâmico. O aumento no teor de fíler propicia aumento no valor de todas as propriedades das argamassas, exceto o teor de ar incorporado.

A massa específica e massa unitária também são grandezas importantes de análise. Carneiro (1999) cita que a massa unitária e o índice de vazios são indicadores relevantes para a avaliação da compacidade dos agregados miúdos naturais, devendo ser analisado em conjunto com a curva granulométrica.

As composições granulométricas das argamassas foram definidas com ensaio de acordo com a norma NM 248 (2003). Foi executado peneiramento a seco das argamassas comercializadas em peneirador mecânico. Medeiros (2002) cita que em seu trabalho um tempo de 30 minutos permitiu separação total das frações sem necessidade de lavagem para extração dos finos.

As argamassas foram peneiradas em uma série de peneiras conforme Quadro 9, montadas no peneirador mecânico do Laboratório Didático de Materiais da UFPR.

Quadro 9 - Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria

Número (ABNT)	Abertura (mm)
4	4,750
8	2,360
16	1,180
30	0,600
50	0,300
100	0,150
200	0,075

Fonte: O autor (2016).

O material passante na peneira de número 200 (0,075 mm) é coletado e encaminhado para o ensaio de granulometria a laser. Este foi realizado segundo a norma ISO 13320 (2009)

por via úmida através do granulômetro Mastersizer 2000 da marca Malvern no laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Votorantim Cimentos (Figura 38).

Figura 38 - Equipamento utilizado para ensaio de granulometria a laser.



Fonte: O autor (2016).

3.3.1.5. Massa unitária e massa específica

A massa específica das argamassas industrializadas foi levantada de acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001), e a massa unitária baseado na NBR NM 45 (ABNT, 2006). A massa específica mede a relação entre massa do agregado seco e seu volume, excluindo os vazios e a massa unitária no estado solto mede a relação entre a massa do agregado que ocupa um recipiente e o volume desse recipiente.

A massa específica foi avaliada com a utilização de frasco de Le Chatelier preenchido com querosene com seu volume inicial calibrado na marca zero. Introduziu-se 60 gramas de argamassa no seu interior e tomada a medida de variação de volume. Desta forma a massa específica é calculada de acordo com a equação (8):

$$ME = \frac{m}{V} = \frac{60}{V} \quad (8)$$

Onde V é o volume final do líquido no frasco.

A massa unitária foi medida utilizando frasco de volume 399,27 cm³ preenchido com material através de queda via funil de vidro com altura padronizada a 30 centímetros do fundo do recipiente, a fim de evitar variação de compactação entre amostras (Figura 39).

Figura 39 - Equipamento para determinação da massa unitária doas argamassas.



Fonte: O autor (2016).

Desta forma a massa específica é calculada de acordo com a equação (9):

$$MU = \frac{m}{V} = \frac{m}{399,27} \quad (9)$$

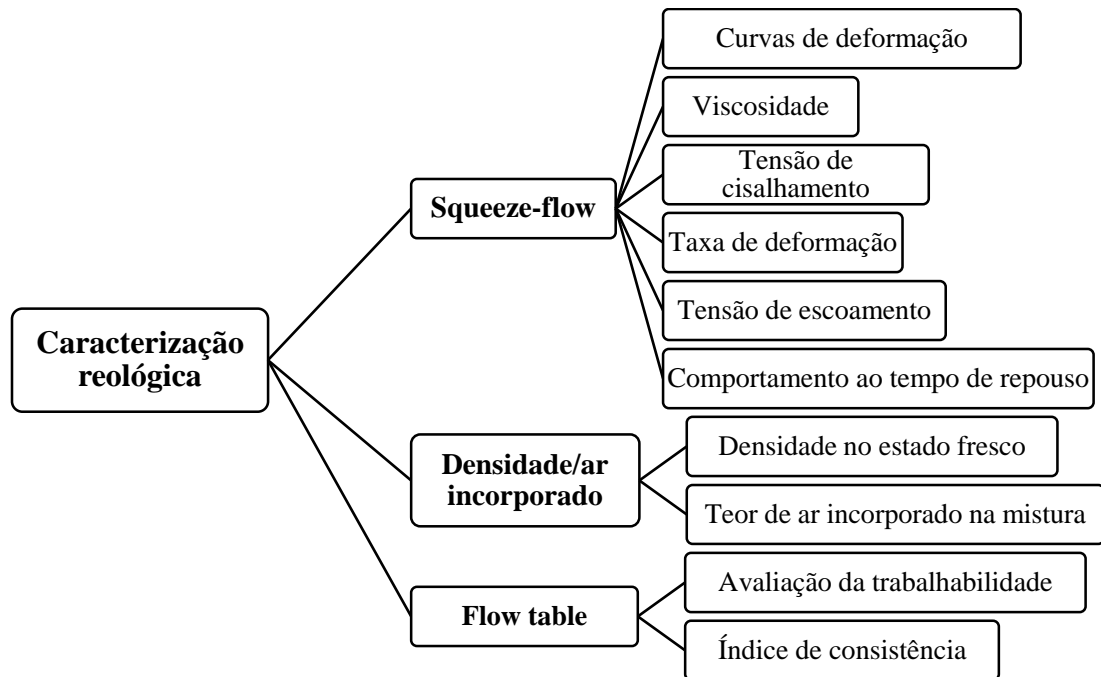
Onde m é a massa que preenche o frasco.

Para as argamassas dosadas, a título de comparação com as industrializadas, a avaliação das massas unitária e específica foi feita de maneira semelhante para os dois tipos de unidades de análise. Foi realizada mistura a seco do cimento com agregado para avaliação destas grandezas para a argamassa de referência (AD-R), e então incluídos os aditivos referentes às argamassas AD-EVA e AD-SA, realizando-se assim os ensaios.

3.3.2. Ensaios de caracterização reológica em estado fresco

Este estudo analisou o comportamento reológico das argamassas de reparo através de dois ensaios, sendo o *squeeze-flow* o ensaio principal e outros dois auxiliares: densidade no estado fresco e teor de ar incorporado. A Figura 40 apresenta as técnicas e as respostas de cada ensaio para avaliação do comportamento reológico das argamassas estudadas.

Figura 40 - Técnicas aplicadas para caracterização reológica das argamassas estudadas



Fonte: O autor (2016).

O Quadro 10 apresenta em resumo o número de unidades de análise para caracterização reológica do estudo.

Quadro 10 - Unidades de análise para caracterização reológica das argamassas de reparo.

Argamassa	Squeeze-flow ¹⁰			Densidade/ar incorporado	Flow-table
	0,1 mm/s	1,0 mm/s	3,0 mm/s		
AI-1	6	6	6	3	3
AI-2	6	6	6	3	3
AI-3	6	6	6	3	3
AI-4	6	6	6	3	3
AI-5	6	6	6	3	3
AD-R	6	6	6	3	3
AD-EVA	6	6	6	3	3
AD-SA	6	6	6	3	3
Total	48	48	48	24	24

Fonte: O autor (2016).

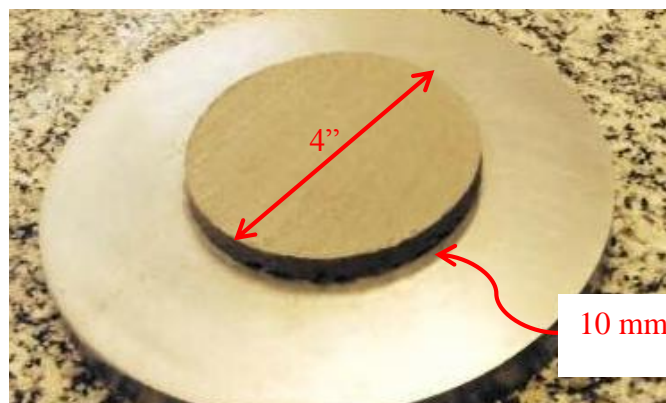
¹⁰ Serão ensaiados 3 corpos de prova para tempo zero (imediatamente após a mistura) e 3 corpos de prova 20 minutos após a mistura (t=20).

3.3.2.1. Comportamento reológico por *squeeze-flow*

Para o ensaio de comportamento reológico sob ação de carga serão obedecidos os preceitos da norma NBR 15839 (ABNT, 2010) que trata dos métodos aplicados a argamassas de revestimento.

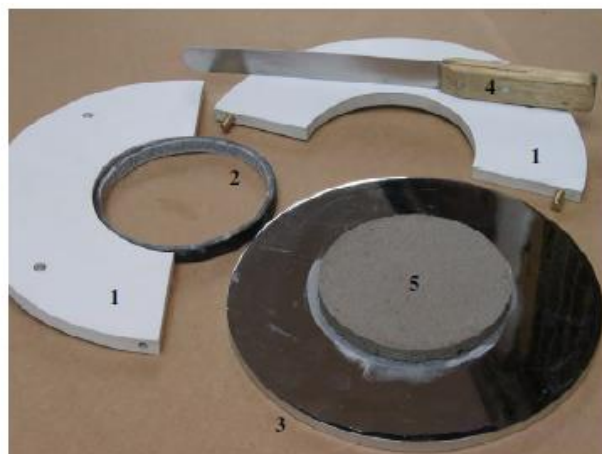
Os corpos de prova de diâmetro igual a 4 polegadas (101,6 milímetros) e espessura de 10 milímetros (Figura 41) foram moldados centralizados sobre prato metálico que se encaixa no suporte para célula de carga da prensa. A moldagem foi auxiliada por gabarito bipartido, permitindo a centralização adequada do corpo de prova no prato metálico. Assim que o corpo de prova está devidamente rasado no nível do molde, este é retirado permitindo que o deslocamento do material aconteça de forma livre. Os equipamentos utilizados para confecção do corpo de prova estão apresentados na Figura 42.

Figura 41 - Corpo de prova para ensaio de comportamento reológico por *squeeze-flow*.



Fonte: O autor (2016).

Figura 42 - Equipamentos para moldagem do corpo de prova para ensaio de *squeeze-flow*.

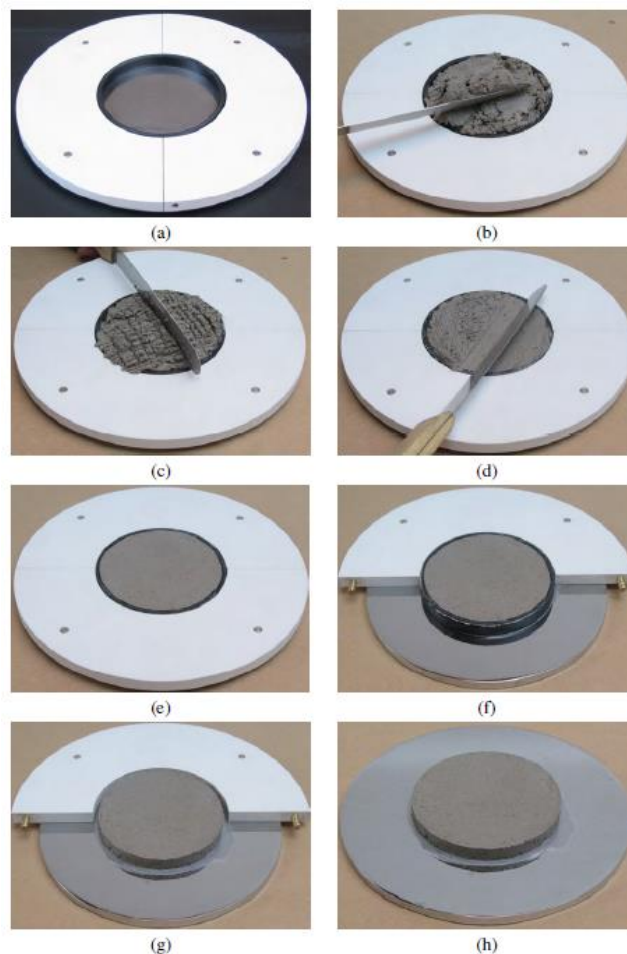


Fonte: CARDOSO, JOHN e PILLEGI (2010).

A montagem do corpo de prova para este ensaio foi feita baseada no proposto por Cardoso, John e Pileggi (2010) e está exposta sequencialmente na Figura 43 e apresenta: (a) posicionamento do gabarito bipartido; (b) preenchimento do molde anelar com argamassa; (c) golpes de espátula, sendo dez (10) em qualquer direção e mais dez (10) na direção perpendicular à primeira; (d) rasamento do corpo de prova; (e) corpo de prova rasado; (f) retirada da primeira parte do gabarito; (g) retirada do anel de PVC; (h) corpo de prova finalizado.

Os ensaios foram realizados a duas idades, sendo a primeira imediatamente após a mistura, denominada como tempo zero ($t=0$) e outra com um tempo de 20 minutos após a mistura ($t=20$), o que permite estabelecer um melhor entendimento do efeito do repouso sobre o comportamento do material. Os fabricantes de argamassas industrializadas determinam tempos diferentes, tanto para mistura quanto para aplicação dos produtos, conforme apresentado no Quadro 11. O tempo de 20 minutos foi estipulado a título de padronização como base de comparação entre os produtos para análise das condições de trabalhabilidade.

Figura 43 - Sequência de montagem de corpo de prova para ensaio de squeeze-flow



Fonte: CARDOSO, JOHN e PILLEGI (2010).

Quadro 11 - Tempos de mistura e trabalhabilidade das argamassas industrializadas

Argamassa	Tempo de mistura	Tempo para aplicação após a mistura
AI-1	5 minutos	Até 20 minutos
AI-2	3 a 4 minutos	Não especificado
AI-3	3 a 4 minutos	Não especificado
AI-4	“Até obter mistura pastosa e homogênea.”	Até 40 minutos
AI-5	3 a 5 minutos	Até 30 minutos

Fonte: Fabricantes (2016).

A aplicação da carga foi dada através da prensa EMIC DL-10000, disponível no Laboratório de Tecnologia de Argamassas da UFPR (LATECA), apresentada na Figura 44 com a punção de 4 polegadas (101,6 milímetros). Foram utilizadas placas metálicas lisas superior e inferior. As velocidades de carregamento aplicadas foram as duas previstas na norma NBR 15839 (ABNT, 2010), 0,1 mm/s e 3,0 mm/s, além de uma velocidade intermediária de 1,0 mm/s.

O substrato de deslizamento da amostra é um elemento importante na avaliação dos resultados. No caso deste trabalho foi escolhida uma base metálica não absorvente, que, segundo Romano (2013) é vantajosa por eliminar a variável absorção das análises.

Figura 44 - Corpo de prova para *squeeze-flow* sendo posicionado na prensa.

Fonte: O autor (2016).

3.3.2.2. Densidade e teor de ar incorporado

De acordo com Cardoso (2009) a densidade aparente no estado fresco de uma argamassa de revestimento é uma característica importante a ser avaliada, pois determina a massa do material que o aplicador sente no lançamento, o que pode prejudicar a produtividade. No caso

de reparos pontuais, onde o material é aplicado de forma concentrada e em pouco volume, essa característica não tem grande importância na produtividade, porém argamassas muito pesadas podem, por atuação da força gravitacional, prejudicar a adesão no substrato.

Mattana *et al.* (2012) consideram que uma baixa densidade de massa no estado fresco gera economia de material, por este possuir menos massa em um mesmo volume. Este fator pode ser interessante no sentido econômico, pois as argamassas de reparo industrializadas são geralmente de alto custo.

Mattana *et al.* (2012) concluíram que quanto maior o teor de ar incorporado, melhor a trabalhabilidade e, conseqüentemente, menor a resistência mecânica. Stolz (2011) explica que o aumento da quantidade de ar leva ao aumento do índice de consistência e a redução da resistência de aderência, assim como o estudo de Romano, Torres e Pileggi (2015) mostrou que as maiores resistências de aderência de argamassas aconteceram para menores quantidades de aditivo incorporador de ar na mistura.

A norma NBR 13278 (ABNT, 2005) apresenta a seguinte equação para determinação do teor de ar incorporado – equação (10):

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (10)$$

Onde:

A = teor de ar incorporado na mistura;

d = densidade de massa da argamassa no estado fresco;

d_t = densidade teórica da argamassa que deve ser calculada conforme as equações:

$$d_t = \frac{m_s + m_{\text{água}}}{m_s/\gamma_s + m_{\text{água}}} \text{ para argamassas industrializadas} \quad (11)$$

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum m_i/\gamma_i} \text{ para argamassas dosadas em obra} \quad (12)$$

Onde:

m_s = massa da argamassa anidra;

$m_{\text{água}}$ = massa de água que compõe a argamassa seca;

γ_s = massa específica da argamassa anidra;

m_i = massa seca de cada componente da argamassa, incluindo a água;

γ_i = massa específica de cada componente da argamassa.

A partir da equação (10) nota-se que quanto maior a densidade, menor o teor de ar incorporado e, conseqüentemente, maior massa e maior resistência mecânica. Com todo o exposto neste item, conclui-se que é de grande importância o conhecimento destas grandezas do estado fresco para as argamassas de reparo, para que o profissional tenha ferramentas para dimensionar um reparo adequado com o menor custo possível e menor consumo de material.

A determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado no estado fresco segue a norma NBR 13278 (ABNT, 2005). Para determinação destas grandezas, foi utilizado um recipiente metálico de volume conhecido igual a 399,27 cm³.

3.3.2.3. Mesa de consistência (Flow-table)

A determinação do índice de consistência das argamassas por meio de mesa vibratória segue o determinado na NBR 13276 (ABNT, 2002), cujo procedimento é originalmente dedicado a argamassas de revestimento. O equipamento de ensaio utilizado (mesa e molde) está apresentado na Figura 42 e está disponível no Laboratório de Tecnologia de Argamassas da UFPR.

Figura 45 - Mesa de consistência e molde tronco-cônico para ensaio de determinação do índice de consistência de argamassas.



Fonte: O autor (2016).

De acordo com a norma, com o tampo da mesa devidamente limpo e levemente úmido, deve-se preencher o molde tronco-cônico centralizado sobre a mesa em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais, e aplicar em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete padrão, rasando com régua metálica o excedente na borda do

molde antes de removê-lo com um movimento vertical. Deve-se então acionar a manivela da mesa por 30 vezes durante 30 segundos e, após a última queda, medir o diâmetro do espalhamento do molde tomados em três pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro. O índice de consistência da argamassa corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo.

3.3.3. Ensaios de desempenho no estado endurecido

Os quatro ensaios utilizados para estudo do desempenho das argamassas em estado endurecido estão descritos e detalhados neste item.

No total foram confeccionados 96 corpos de prova para avaliação destes parâmetros. O Quadro 12 relaciona os corpos de prova para realização dos ensaios.

Quadro 12 - Relação de corpos de prova para ensaios de estado endurecido.

Argamassa	Resistência mecânica, módulo de elasticidade e densidade ¹¹			Variação dimensional
	1 dia	7 dias	28 dias	Até 28 dias ¹²
AI-1	3	3	3	3
AI-2	3	3	3	3
AI-3	3	3	3	3
AI-4	3	3	3	3
AI-5	3	3	3	3
AD-R	3	3	3	3
AD-EVA	3	3	3	3
AD-SA	3	3	3	3
Total	24	24	24	24

Fonte: O autor (2016).

3.3.3.1. Determinação da resistência à tração na flexão e compressão

Para os ensaios de resistência mecânica foram moldados corpos de prova prismáticos, de 40 mm x 40 mm x 160 mm. São três (3) corpos de prova para cada argamassa para cada idade (1 dia, 7 dias e 28 dias) e a resistência característica para cada idade foi tomada através da média dos resultados das rupturas.

¹¹ Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico e da densidade no estado endurecido são não-destrutivos, portanto será utilizado o mesmo corpo de prova para todos estes ensaios, sendo estes rompidos apenas para determinação das resistências mecânicas.

¹² Serão levantadas medidas de variação linear dos corpos de prova em diferentes idades até 28 dias, onde fica estipulada a data final do ensaio para nível de comparação entre amostras.

Figura 47 – Corpo de prova posicionado para ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: O autor (2016).

A avaliação da resistência à compressão utiliza as duas metades do corpo de prova rompido no ensaio de resistência à tração na flexão. Foi utilizada para ambos os ensaios a prensa EMIC DL-10000, disponível no Laboratório de Tecnologia de Argamassas da UFPR, alterando, para cada ensaio, a célula de carga e também a sua velocidade de aplicação: 50 N/s para ensaio de tração e 500 N/s para ensaio de compressão, conforme descrito na norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.3.3.2.Determinação da densidade no estado endurecido

A determinação da densidade no estado endurecido foi efetuada conforme norma NBR 13280 (ABNT, 2005) e, além de avaliar a evolução da densidade durante as idades, serve como dado para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

A densidade será avaliada através da equação (13):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

Onde:

ρ = densidade do corpo de prova [g/cm³];

V = volume do corpo de prova [cm³];

m = massa do corpo de prova.

O volume do corpo de prova foi obtido pela multiplicação das médias da medida das arestas de cada um dos lados do corpo de prova. A média é dada pela tomada de duas medidas com paquímetro, uma em cada extremidade do corpo de prova. A massa é, então, medida com balança de precisão de 0,01 grama. Foi utilizado o corpo de prova moldado para determinação da resistência mecânica previamente à sua ruptura.

3.3.3.3. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas foi avaliado através da tomada de velocidade de onda ultrassônica pelo interior do corpo de prova no sentido longitudinal, conforme norma NBR 15630 (ABNT, 2009) para argamassas de revestimento. Foi utilizado o corpo de prova moldado para determinação da resistência mecânica previamente à sua ruptura.

O valor da velocidade de onda foi obtido através de medição com equipamento modelo Proceq Pundit Lab+, calibrado para que uma onda de frequência de 250 kHz que atravessa o bloco de calibração do equipamento em 25,4 μ s, seja emitida por transdutor de 280 milímetros de diâmetro e percorra um corpo de prova prismático de 40 x 40 x 160 milímetros no sentido longitudinal, sendo captada por outro transdutor similar ao emissor (Figura 48) e aplicado na equação (14).

$$E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (14)$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

ρ = densidade do corpo de prova (obtida em 3.3.3.2) [kg/m³];

V = velocidade da onda ultrassônica [km/s];

ν = coeficiente de Poisson.

Um estudo de Sideris, Manita e Sideris (2004) mostra que o coeficiente de Poisson de um material cimentício varia em função da hidratação, ou seja, há aumento do coeficiente em função da idade. Entre 7 e 28 dias de hidratação houve acréscimo de 23,4% no valor deste coeficiente. O estudo mostra que há boa correlação entre o valor determinado experimentalmente e a equação exponencial exposta em (15), com o tempo em dias.

$$\nu = 0,3515 - 0,2726t^{-0,394} \quad (15)$$

Figura 48 - Aparelho de medição da velocidade das ondas ultrassônicas



Fonte: O autor (2016).

Deve-se atentar para algumas propriedades dos corpos de prova que podem afetar os resultados obtidos por este ensaio, como a retificação dos topos, presença de desmoldantes ou sujeiras impregnadas na superfície, vazios no concreto, segregação e fissuras (PACHECO *et al*, 2014).

3.3.3.4. Determinação da variação dimensional

O índice de retração foi avaliado através da medição periódica da variação dimensional linear de corpos de prova de 25 x 25 x 285 milímetros, mantidos permanentemente em câmara de temperatura e umidade controladas a $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(60 \pm 5)\%$ respectivamente, conforme orienta a NBR 15261 (ABNT, 2005). As medições foram feitas utilizando equipamento específico apresentado na Figura 49.

Ao final do período de 28 dias, obtém-se a variação dimensional em milímetros por metro que permite avaliar a retração por secagem de cada argamassa.

Figura 49 - Equipamento para medição de variação dimensional linear.



Fonte: O autor (2016).

3.3.4. Ensaios para estudo da resistência de aderência

O preparo dos corpos de prova de substratos foi baseado no trabalho de Doria, Sales e Andrade (2015). Após serem desmoldados e curados por 28 dias por imersão em água, os corpos de prova de substrato passaram por processo de cura em laboratório por 30 dias. Então os corpos de prova receberam os tratamentos na interface conforme determinado para o ensaio específico, a fim de padronização entre amostras e de preparação conforme estipulado nos manuais de reparo de estruturas (HELENE, 1992; SOUZA e RIPPER, 1998; RED REHABILITAR, 2003).

Foram produzidos nove (9) corpos de prova para cada argamassa para os ensaios de aderência à tração na flexão, aderência ao cisalhamento direto e aderência ao cisalhamento oblíquo, sendo três (3) para cada idade (1 dia, 7 dias e 28 dias). Para o ensaio de tração direta, feito sobre substrato em forma de placa, foram moldados doze (12) corpos de prova, sendo quatro (4) para cada idade. Por ser um ensaio dependente da colagem das pastilhas, a avaliação da aderência à tração direta foi feita nas idades 2, 7 e 28 dias, já que é necessário 1 dia para que o corpo de prova tenha rigidez suficiente para aplicação da cola e mais 1 dia para a secagem desta. Também, por haver a possibilidade de ruptura na interface entre cola e matriz ou cola e

substrato, optou-se por moldar um corpo de prova a mais. Para este ensaio, foi utilizada uma placa para cada argamassa.

No total foram confeccionados 312 corpos de prova para avaliação da resistência de aderência. O Quadro 13 relaciona os corpos de prova para realização dos ensaios de resistência de aderência.

Quadro 13 - Relação de corpos de prova para ensaios de resistência de aderência

Argamassa	Aderência à tração direta			Aderência à tração na flexão			Aderência ao cisalhamento direto			Aderência ao cisalhamento oblíquo		
	2 dias	7 dias	28 dias	1 dia	7 dias	28 dias	1 dia	7 dias	28 dias	1 dia	7 dias	28 dias
AI-1	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
AI-2	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
AI-3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
AI-4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
AI-5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
AD-R	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
AD-EVA	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
AD-SA	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Total	32	32	32	24	24	24	24	24	24	24	24	24

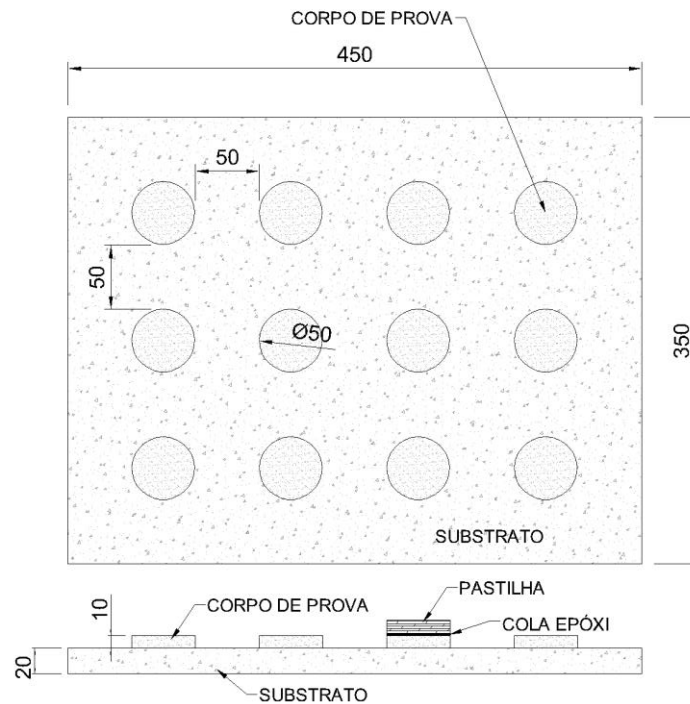
Fonte: O autor (2016).

3.3.4.1. Aderência à tração direta

O ensaio de resistência de aderência à tração direta consiste em aplicar uma carga de tração perpendicular à superfície de contato entre o material de reparo e o substrato.

A norma NBR 13528 (ABNT, 2010) que direciona este ensaio para argamassas de revestimento orienta a execução de cortes com serra-copo na argamassa antes da colagem da pastilha que suporta a célula de carga. Experiências anteriores com argamassas de reparo, como a de Medeiros (2002) mostram que a utilização da serra-copo pode causar destacamento da argamassa do substrato, provavelmente pelo excesso de vibração na tentativa de cortar um material excessivamente rígido. Portanto, para este trabalho, serão moldados os corpos de prova com a dimensão correta da pastilha em substrato preparado conforme Figura 50.

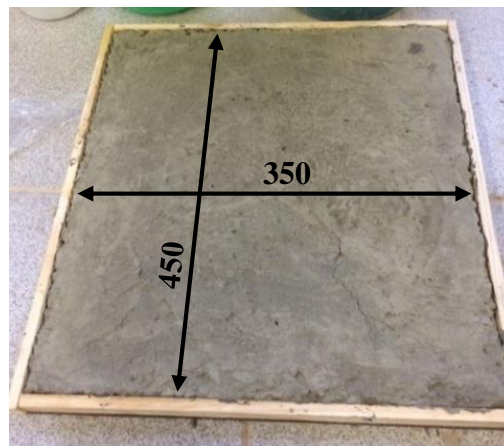
Figura 50 - Montagem dos corpos de prova para ensaio de resistência à tração direta.



Fonte: O autor (2016).

A placa de substrato foi moldada utilizando formas de madeira com as dimensões internas de acordo com a Figura 50. A Figura 51 apresenta a placa antes da desforma.

Figura 51 – Placa de substrato para ensaio de resistência de aderência à tração direta



Fonte: O autor (2016).

A moldagem dos corpos de prova sobre a placa de substrato foi feita através do preenchimento com argamassa de reparo de um anel de PVC com diâmetro interno de 47,9 milímetros e altura de 10 milímetros com a superfície do substrato saturada, sendo o processo

de umedecimento feito por borrifos de água. O adensamento do corpo de prova foi realizado manualmente pela mesma pessoa em todas as amostras.

Após 1 dia de cura com controle de perda de umidade, foi aplicada sobre a amostra cola a base de resina epóxi bicomponente, com tempo mínimo para endurecimento de 24 horas, e então posicionada a pastilha metálica, de acordo com o proposto pela norma NBR 13528 (2010).

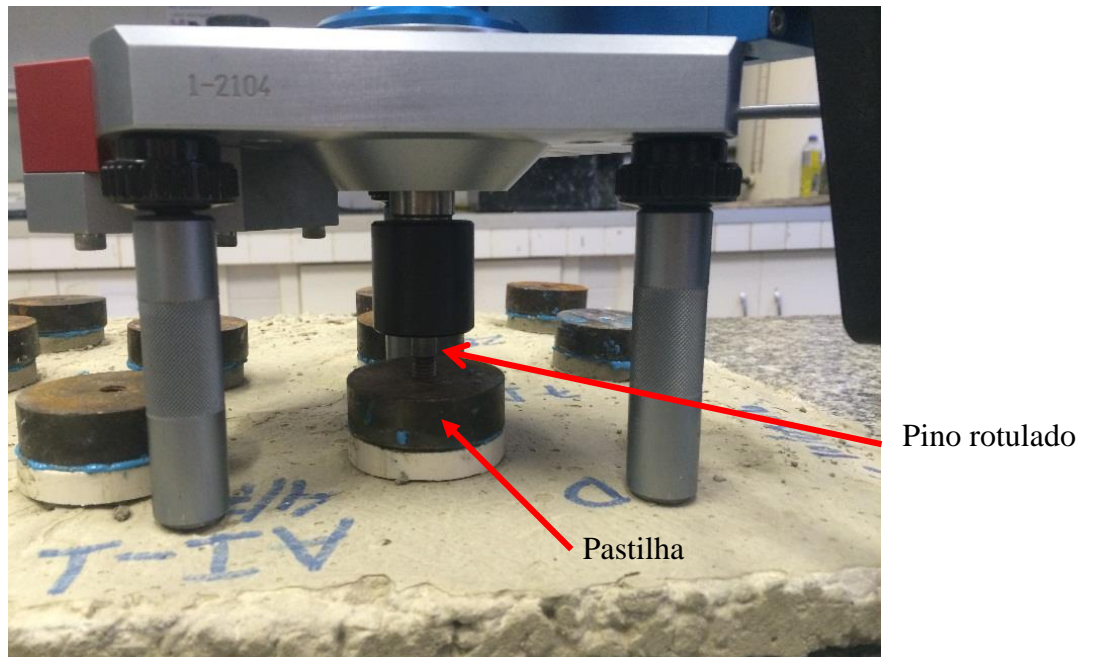
O arrancamento dos corpos de prova foi realizado através do dinamômetro de tração Dyna Z16E da marca Proceq operado manualmente com taxa de carga de 50 N/s, que é acoplado a um dinamômetro que regula a taxa de carga e permite visualizar a força aplicada no corpo de prova (Figura 52). O dinamômetro é ligado à pastilha, presa ao corpo de prova com adesivo epóxi de alta resistência, através de pino em encaixe rotulado (Figura 53).

Figura 52 - Equipamento *pull-off tester* utilizado no ensaio de resistência de aderência à tração direta.



Fonte: O autor (2016).

Figura 53 - *Pull-off tester* acoplado à pastilha do corpo de prova.



Fonte: O autor (2016).

O pico de carga registrado pelo dinamômetro, que representa o esforço no instante da ruptura, é aplicado na equação (16) para determinação da tensão de resistência de aderência à tração direta.

$$\sigma = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D^2} \quad (16)$$

Onde:

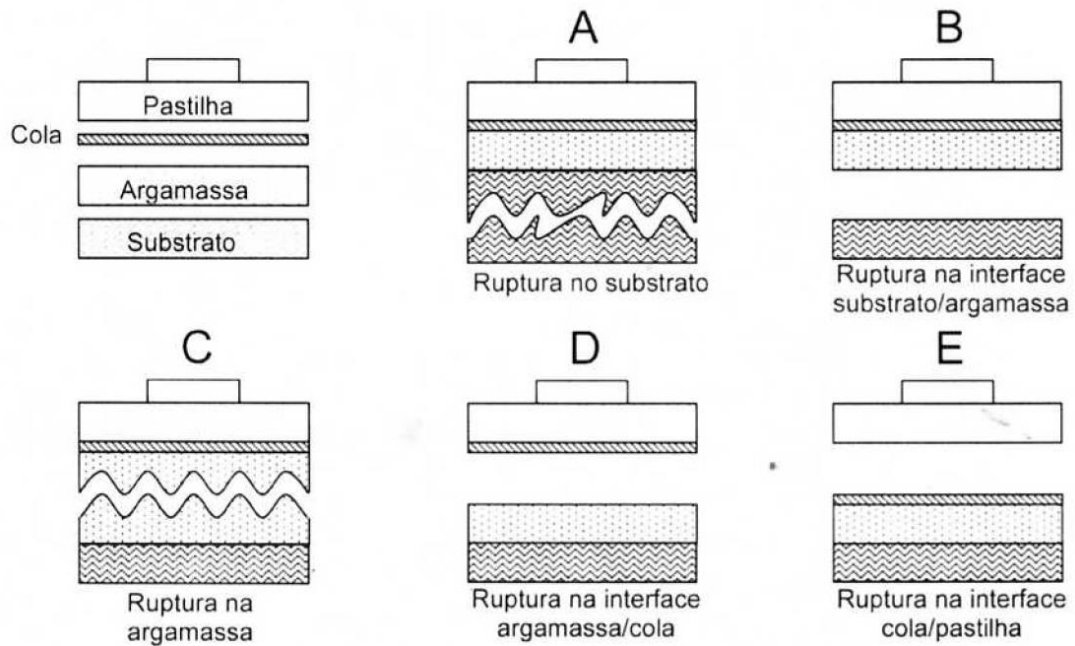
σ = Tensão de aderência à tração direta, em MPa;

P = Pico de carga registrado pelo dinamômetro, em Newton;

D = Diâmetro do corpo de prova (diâmetro interno do anel de forma), em milímetros.

A norma NBR 13528 (ABNT, 2010) apresenta as formas de ruptura em relação à seção transversal do corpo de prova, segundo mostra a Figura 54.

Figura 54 - Formas de ruptura no ensaio de resistência à tração direta.

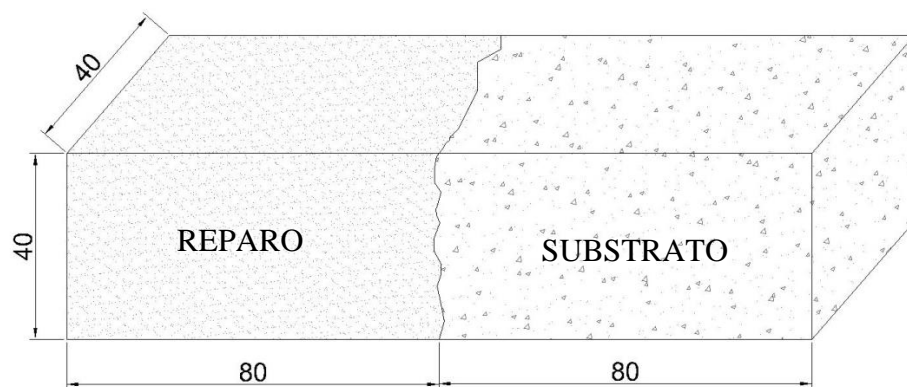


Fonte: ABNT (2010).

3.3.4.2. Aderência à tração na flexão

O ensaio de aderência à tração na flexão foi realizado através da montagem e ruptura à flexão de corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 milímetros, sendo 80 milímetros da sua extensão preenchido de concreto (substrato) e os outros 80 milímetros com argamassa de reparo, baseado nos trabalhos de Alliche e Mallat (2011) e Yunpeng *et al* (2014), conforme Figura 55.

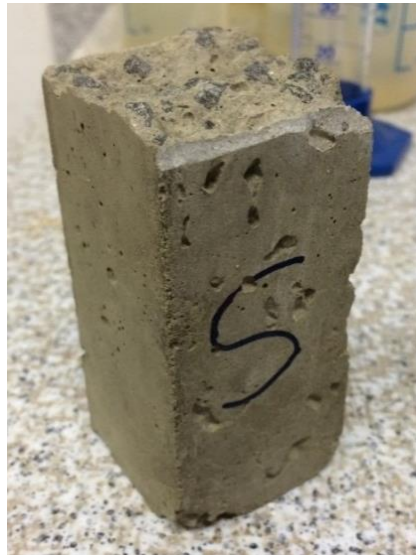
Figura 55 - Montagem do corpo de prova para ensaio de resistência de aderência à tração na flexão.



Fonte: O autor (2016).

Para a confecção do substrato (Figura 56), foi moldado o corpo de prova em sua totalidade com concreto e, então, este foi submetido ao ensaio de tração na flexão com o plano de ruptura induzido através de um corte reto na face inferior. A metade então é reposicionada no molde e a argamassa de reparo é introduzida.

Figura 56 - Substrato para ensaio de tração na flexão



Fonte: O autor (2016).

Após o reposicionamento do substrato na forma, o preenchimento com a matriz foi feito padronizando o adensamento de forma manual, preenchendo todo o volume da fôrma. O substrato foi molhado através de borrifos de água até que a superfície se encontre saturada, de acordo com o apresentado na Figura 57.

Figura 57 - Procedimento de saturação da superfície de contato do substrato.



Fonte: O autor (2016).

Os corpos de prova após moldados permaneceram em processo de cura ao ar livre com temperatura e umidade controladas em câmara seca, de 20°C e 60% respectivamente, a fim de criar padronização de perda de umidade entre todas as amostras. Ao chegar a idade de ruptura (1, 7 e 28 dias) os corpos de prova foram posicionados na prensa de forma análoga ao proposto pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005), com o plano de aplicação de carga localizado exatamente na interface, conforme mostra a Figura 58, sendo a carga aplicada a uma velocidade de 50 N/s.

Figura 58 – Corpo de prova posicionado para ensaio de aderência à tração na flexão



Fonte: O autor (2016).

O valor da tensão de resistência de aderência é obtido através da equação que determina a tensão normal máxima por esforços de flexão, assumindo as hipóteses simplificadoras da Resistência dos Materiais (a deformação longitudinal na linha neutra é nula, o material de reparo é considerado homogêneo e a linha neutra passa pelo centroide da área da seção transversal). A equação é descrita em (17):

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y \quad (17)$$

Onde:

σ = tensão normal limite de ruptura (em MPa);

y = distância da face superior ou inferior do corpo de prova até o centro de massa da seção (20 milímetros);

M = momento fletor devido à carga aplicada (em N.mm), que pode ser escrito como:

$$M = \frac{P \cdot x}{4} \quad (18)$$

Onde:

P = carga máxima de ruptura (em Newtons);

x = vão livre entre os apoios do corpo de prova na prensa (100 milímetros)

I = momento de inércia da seção transversal do corpo de prova em relação ao seu centroide, que pode ser escrito como:

$$I = \frac{l^4}{12} \quad (19)$$

Onde:

l = dimensão da aresta do corpo de prova (40 milímetros).

Aplicando os dados de contorno do ensaio na equação (17), tem-se (20), que é a expressão que determina a tensão limite de resistência à flexão para estas condições de ensaio:

$$\sigma = \frac{P}{426,67} \quad (20)$$

3.3.4.3. Aderência ao cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto foi baseado nos trabalhos de Medeiros (2002) e Medeiros, Helene e Selmo (2009). Consiste em aplicar carga no sentido transversal ao eixo longitudinal do corpo de prova de 40 x 40 x 160 milímetros, o mesmo utilizado no ensaio de resistência de aderência à tração na flexão (Figura 55). O corpo de prova é adaptado a um suporte metálico que permite o engastamento do elemento, impedindo qualquer movimentação.

O processo de moldagem, adensamento e cura é o mesmo aplicado no ensaio de resistência de aderência à tração na flexão descrito em 3.3.4.2. A carga é aplicada pela prensa a uma velocidade de 50 N/s na matriz, em um plano imediatamente adjacente ao plano da interface, conforme mostra a Figura 59.

Figura 59 - Corpo de prova posicionado para ensaio de aderência ao cisalhamento direto.



Fonte: O autor (2016).

A tensão limite de cisalhamento direto é avaliada através da equação (21):

$$\tau = \frac{P}{l^2} \quad (21)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (em MPa);

P = carga aplicada pela prensa (em Newton);

l = dimensão da aresta da seção transversal do corpo de prova (em milímetros);

Conhecida a dimensão da aresta do corpo de prova (40 milímetros), pode-se aplicar esta condição de contorno em (21) para obtenção da equação (22):

$$\tau = \frac{P}{1600} \quad (22)$$

3.3.4.4. Aderência ao cisalhamento oblíquo

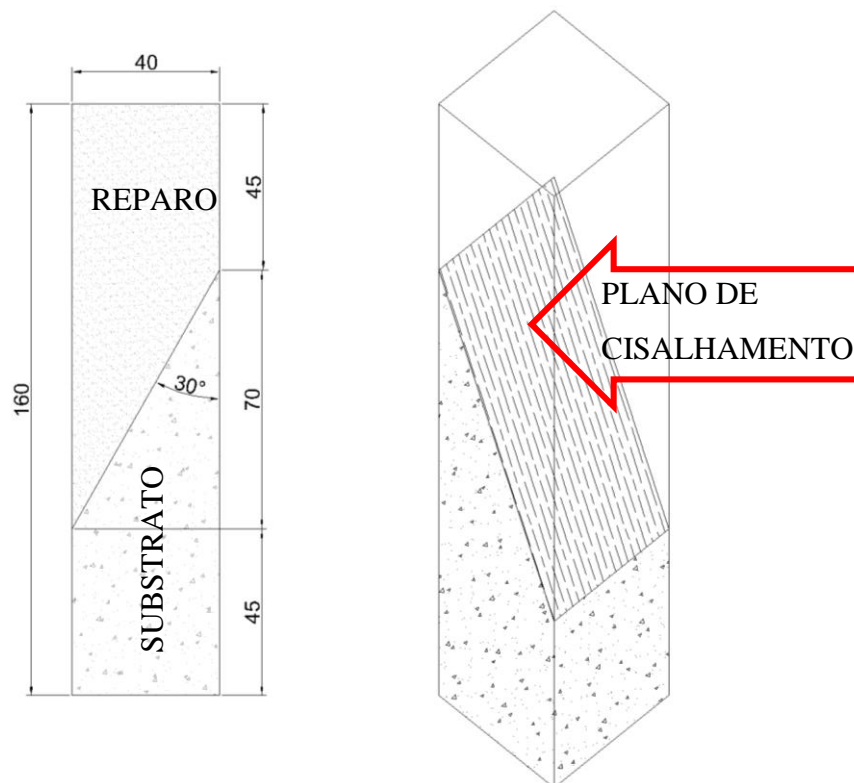
O ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão no sentido longitudinal de corpo de prova prismático de 40 x 40 x 160 milímetros, composto por substrato e argamassa de reparo separados por um plano de cisalhamento orientado a 30 graus em relação à aresta longitudinal, conforme Figura 60, baseado no método utilizado por Doria, Sales e Andrade (2015).

Santana (2004) adotou para este procedimento de avaliação de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo corpo de prova prismático com 120 milímetros de dimensão maior.

Para este trabalho foi utilizado o corpo de prova com 160 milímetros por adequação ao molde disponível.

Doria, Sales e Andrade (2015) utilizaram para seu trabalho um plano de cisalhamento inclinado em 45 graus. Porém, um ângulo menor de inclinação tende a minimizar os efeitos das tensões normais por compressão no corpo de prova, permitindo um melhor isolamento da tensão de cisalhamento.

Figura 60 – Montagem do corpo de prova para ensaio de cisalhamento oblíquo



Fonte: O autor (2016).

O substrato foi confeccionado utilizando fôrma de corpo de prova prismático, com o posicionamento de uma placa separadora de polipropileno na posição conforme as medidas da Figura 60, permitindo a produção de dois substratos por fôrma, apresentados na Figura 61.

Figura 61 - Substratos moldados para ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo.



Fonte: O autor (2016).

Como a placa separadora de polipropileno gera um plano de cisalhamento liso pelas suas características de superfície, este plano foi escarificado anteriormente à moldagem do corpo de prova, a fim de proporcionar um ambiente de interface adequado às características de um reparo em obra, conforme as recomendações dos fabricantes de argamassas industrializadas.

Assim como no ensaio de cisalhamento direto, o processo de moldagem, adensamento e cura é o mesmo aplicado no ensaio de resistência de aderência à tração na flexão descrito em 3.3.4.2.

A carga é aplicada pela prensa a uma taxa constante de 50 N/s nas faces de topo do corpo de prova, provocando tensão de cisalhamento oblíqua na superfície de aderência. A Figura 62 apresenta o posicionamento do corpo de prova para o ensaio.

Conhecida a carga aplicada pela prensa, a tensão no plano de cisalhamento pode ser definida através da equação (23).

$$\tau = \frac{P}{l^2} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (23)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (em MPa);

P = carga aplicada pela prensa (em Newton);

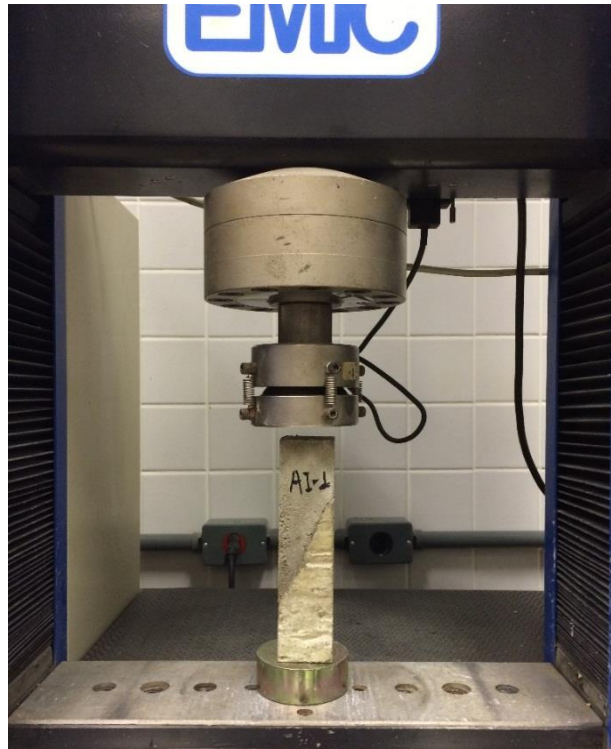
l = dimensão da aresta da seção transversal do corpo de prova (em milímetros);

α = inclinação do plano de cisalhamento.

Conhecidas as dimensões do corpo de prova e conhecido o ângulo de inclinação do plano de cisalhamento, pode-se escrever a equação (24) como:

$$\tau = \frac{P}{3.695,04} \quad (24)$$

Figura 62 – Corpo de prova para avaliação da aderência ao cisalhamento oblíquo posicionado na prensa.



Fonte: O autor (2016).

3.3.5. Microscopia eletrônica de varredura para avaliação da zona de interface

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura com dispersão de energia de raios-X (MEV/EDS) foi realizado no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná (CME) e teve por finalidade analisar a superfície de contato entre a argamassa de reparo e o substrato de concreto no que diz respeito a eficiência das propriedades reológicas sobre a superfície de molhamento.

A utilização de microscopia eletrônica é justificada neste estudo, pois as limitações de ampliação de um microscópio óptico, que é de 2 mil vezes o tamanho real, não permite maiores detalhes de microestrutura do sistema, que é a fase onde se dá a resistência de aderência por

ligações químicas. Um microscópio eletrônico, ao emitir feixes de elétrons para captura das imagens, consegue ampliações maiores que 4 mil vezes o tamanho real.

O ensaio de microscopia é basicamente dividido em três etapas distintas: corte e retificação da amostra, metalização e captura de imagens.

3.3.5.1. Corte e retificação da amostra

A partir de um corpo de prova moldado conforme apresenta a Figura 55, fez-se o corte deste corpo de prova deixando-o com aproximadamente 3 centímetros de espessura (1,5 centímetros de matriz e 1,5 centímetros de substrato) utilizando a prensa para ensaio de compressão. Estas medidas são necessárias para promover encaixe na morsa que fixa a amostra para retífica.

A retificação da amostra é feita através de corte com disco diamantado de precisão a baixa velocidade utilizando a serra SBT 650 da South Bay Technology Inc., apresentada na Figura 63.

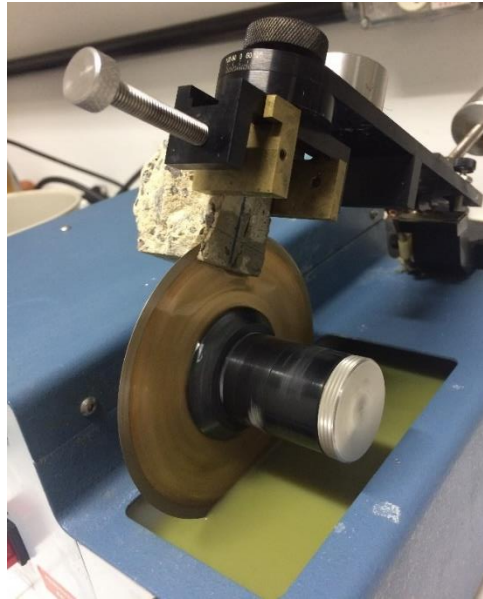
Figura 63 - Serra diamantada para retificação de amostra.



Fonte: O autor (2016).

Este modelo de serra trabalha com faixa de velocidade entre 0 e 300 rpm e admite uma amostra de até 33 milímetros para perfeita fixação. O controle do corte foi feito por gravidade, sendo contrabalanceado através de sistema de gangorra com blocos de alumínio. A lubrificação da lâmina foi feita com óleo de baixa viscosidade. A Figura 64 apresenta a amostra de AI-2 sendo retificada.

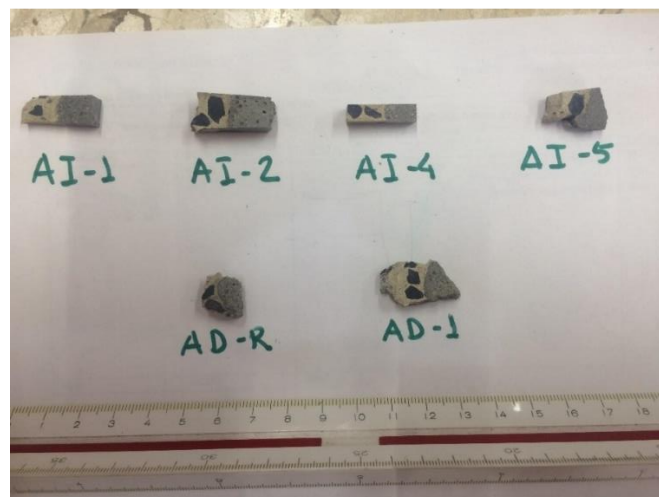
Figura 64 - Processo de retificação de amostra para microscopia.



Fonte: O autor (2016).

A Figura 65 apresenta as amostras retificadas, com exceção de AI-3, cujos corpos de prova romperam no corte inicial e AD-SA, que rompeu na retífica em todas as tentativas.

Figura 65 - Amostras de argamassas retificadas para análise.



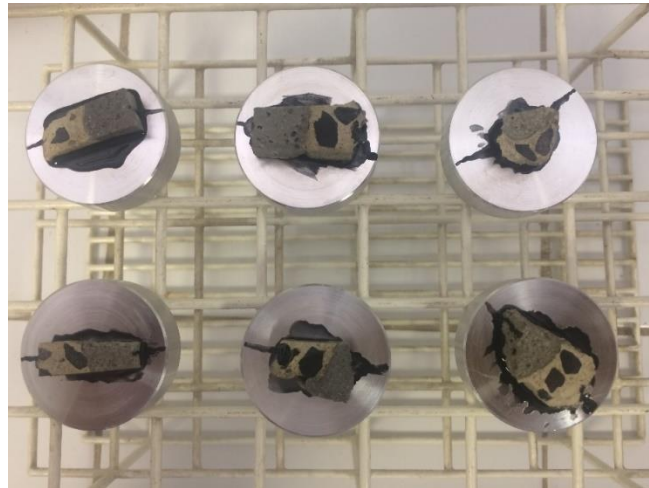
Fonte: O autor (2016).

3.3.5.2. Metalização dos corpos de prova

Após a retificação os corpos de prova passaram por um processo de metalização a ouro depois de vinculados ao porta amostra. Este é um cilindro metálico com 32 milímetros de diâmetro e 10 milímetros de altura que permite encaixe perfeito no microscópio. A vinculação

foi feita com resina misturada com carbono. A Figura 66 apresenta as amostras acopladas ao suporte e a Figura 67 apresenta uma amostra metalizada.

Figura 66 - Amostras fixadas no porta amostras e prontas para a metalização.



Fonte: O autor (2016).

Figura 67 - Amostra metalizada.



Fonte: O autor (2016).

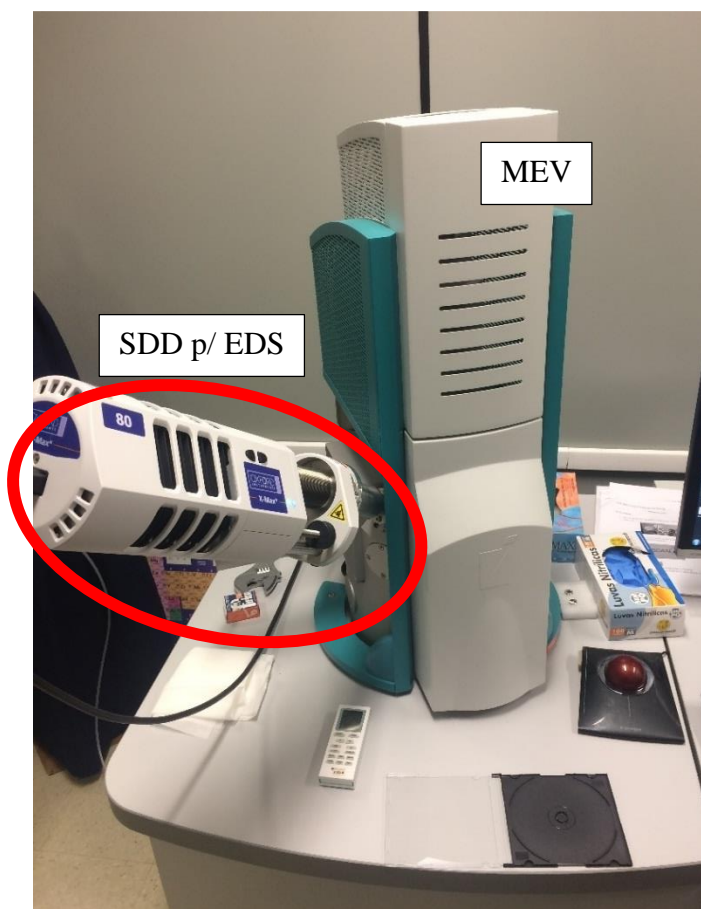
3.3.5.3. Análise de microscopia

O passo pós metalização é a análise propriamente dita. Cada porta amostra é incubado na câmara do microscópio a vácuo controlado com pressão entre 3 e 500 Pa, permitindo-se então fazer a captura de imagens. O microscópio eletrônico de varredura utilizado no ensaio é o modelo VEGA3 LMU da Tescan. Este equipamento permite magnificações de até 300 mil vezes com resolução de até 3 nm. Permite análise de aspectos tridimensionais através de estereoscopia de elétrons secundários aplicativo MeX da Alicona. A espectroscopia de energia

dispersiva (EDS) é realizada com equipamento de detecção por deriva de silício (SDD)¹³ modelo X-MaxN de 80 mm² da marca Oxford, acoplado ao microscópio, e interpretado com o aplicativo AZ Tech (Advanced).

Todo o roteiro de procedimento, da retificação das amostras à captura das imagens foi realizado no Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR com microscópio eletrônico de varredura com detector para EDS acoplado. O equipamento é apresentado na Figura 68.

Figura 68 - Microscópio eletrônico de varredura com detector para EDS acoplado.



Fonte: O autor (2016).

¹³ A detecção por deriva de silício (silicon drift detection - SDD) é comumente utilizada para espectrometria de partículas β de raios-X entre 1 e 300 keV. O baixo número atômico do silício implica uma alta área de choque para absorção fotoelétrica de raios-X e o silício possui pico de escape de raios-X menos proeminente que outros elementos. (Rodrigues, B.H.G. Caracterização dos detectores de raios-X e do sistema imageador do experiment Mirax. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

4.1.1. Fluorescência de raios X

O teor de óxidos obtido para cada uma das amostras de argamassa industrializada a partir do ensaio de fluorescência de raios X, bem como a perda ao fogo, está apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 4 - Teores de óxido e perda ao fogo obtidos a partir de ensaio de FRX.

Óxido	Amostra (Teores em %)				
	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5
SiO ₂	59,5	53,9	62,3	58,2	49,6
CaO	29,7	34,2	27,6	27,6	37,7
Al ₂ O ₃	3,0	2,6	2,0	2,4	3,5
SO ₃	2,2	1,9	1,7	1,4	2,3
Fe ₂ O ₃	1,9	2,0	1,4	1,6	1,7
MgO	0,5	0,4	0,9	0,5	1,5
K ₂ O	0,5	0,9	0,5	0,7	0,6
Na ₂ O	0,3	0,3	0,1	0,1	0,4
TiO ₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
SrO	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
P ₂ O ₅	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Cl	0,1	<0,1	0,1	0,2	-
ZrO ₂	0,1	-	-	-	-
MnO	<0,1	0,1	<0,1	0,1	0,2
P.F.	1,7	3,1	2,8	6,8	1,8

Fonte: O autor (2016).

Pode-se, observando a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**, dividir os elementos componentes em grupos distintos, de acordo com a sua incidência nas amostras. O grupo dos principais componentes das argamassas é composto pelo dióxido de silício (sílica) e pelo óxido de cálcio. Em seguida, pode-se elencar os óxidos que estão presentes em mais de 1% da massa de amostra, no caso o óxido de alumínio (alumina), trióxido de enxofre (óxido sulfúrico) e o óxido de ferro III (hematita). Em outro grupo, pode-se colocar os elementos presentes em mais de 0,5% da massa, como o óxido de magnésio (magnésia) e o óxido de

potássio. Os outros elementos podem ser colocados no grupo dos traços, ou seja, têm pouca incidência nas amostras ou nenhuma incidência em algumas delas.

Pode-se estimar que a alta perda ao fogo da amostra de AI-4 pode ser atribuída a um tipo de cimento composto por fíler calcário, pois como mostra o trabalho de Cincotto e Pereira (2001), que ensaiou quimicamente cinco tipos diferentes de cimento, o cimento CP II-F teve perda ao fogo 3 vezes maior que o CP V-ARI.

4.1.2. Difratometria de raios X

Os resultados da análise de difratometria de raios X estão apresentados na Figura 69. As amostras analisadas apresentam o mesmo perfil mineralógico, conforme observado pela difratometria, sendo os principais picos observados: quartzo (Q), calcita (C) e portlandita (P). Um pequeno pico de magnetita (M) e dolomita (D) puderam ser identificados, evidenciando a presença de ferro e magnésio nas amostras. O Quadro 14 resume os elementos identificados no ensaio.

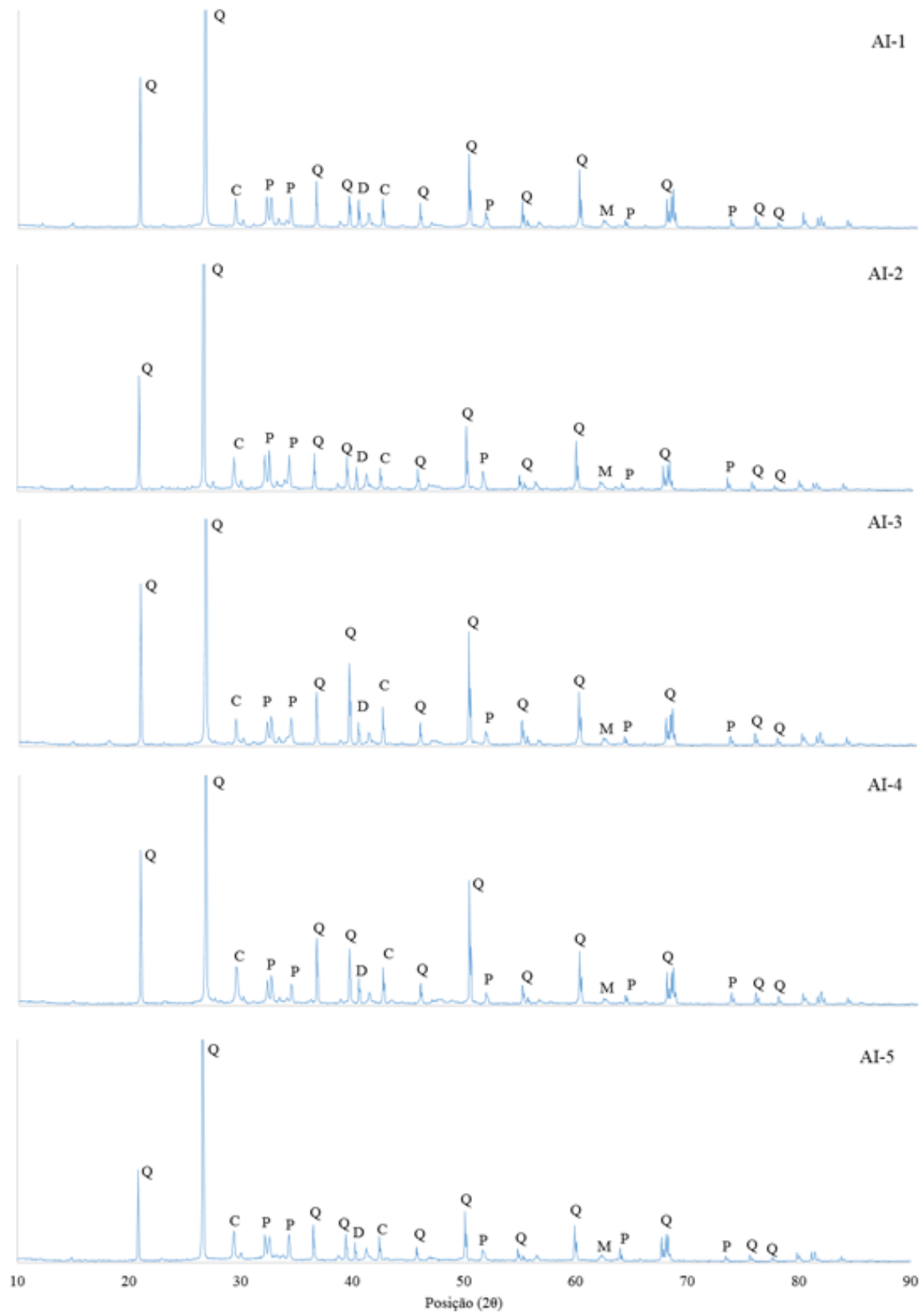
Quadro 14 - Principais elementos presentes nas argamassas industrializadas identificadas pelo ensaio de DRX.

Notação	Mineral	Fórmula química
C	Calcita	CaCO_3
D	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
M	Magnetita	Fe_3O_4
P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Q	Quartzo	SiO_2

Fonte: O autor (2016).

O que se pode observar de particularidade entre amostras é a presença de picos mais intensos de elementos na faixa de posição entre 30° e 50° (2θ) nas argamassas AI-3 e AI-4. Apesar deste fato não representar uma relação quantitativa, pode-se dizer que a presença destes minerais se encontram em proporções diferentes nestas argamassas.

Figura 69 - Difratomogramas de raios X das argamassas industrializadas



Fonte: O autor (2016).

4.1.3. Massa unitária e massa específica

Os ensaios realizados de massa unitária e massa específica apresentaram os resultados expostos na Tabela 5. A partir destes resultados, pode-se obter o índice de vazios de cada uma das amostras, que estão apresentados na mesma tabela.

Tabela 5 - Resultados de massa unitária, massa específica e índice de vazios das argamassas estudadas

Argamassa	Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Índice de vazios (%)
AI-1	1,28	2,70	47,3
AI-2	1,26	2,67	47,3
AI-3	1,41	2,55	55,5
AI-4	1,34	2,71	49,4
AI-5	1,22	2,76	44,3
AD-R	1,58	2,68	59,2
AD-EVA	1,46	2,62	55,9
AD-SA	1,45	2,59	55,8

Fonte: O autor (2016).

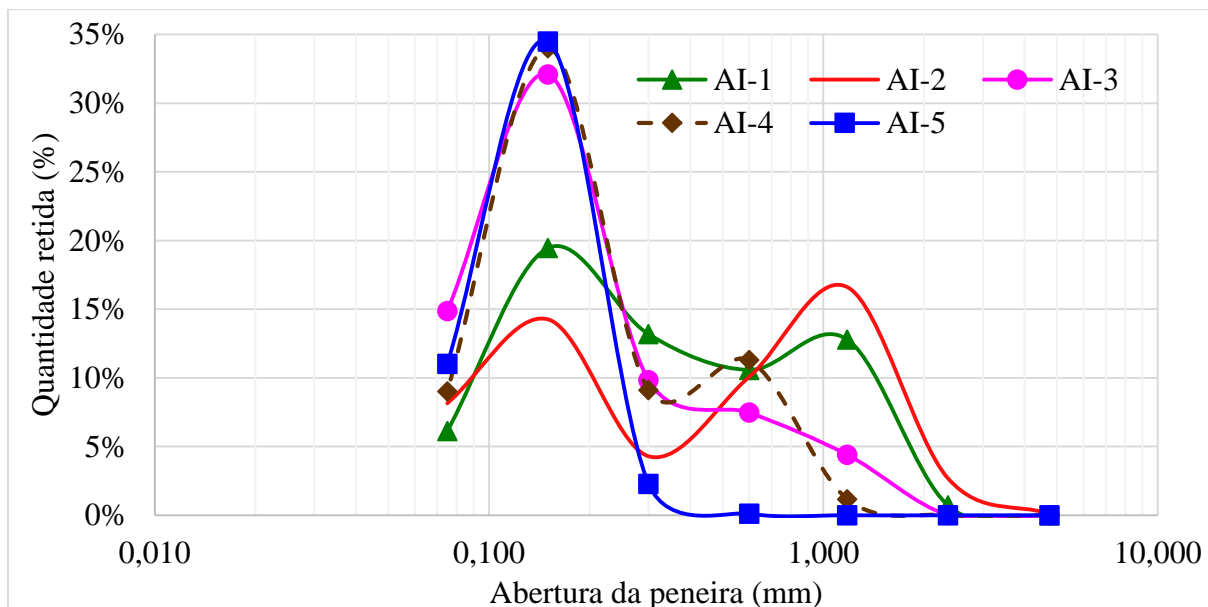
Com os resultados obtidos, pode-se observar uma variação de 1,22 a 1,41 g/cm³ nos valores de massa unitária e de 2,55 a 2,76 g/cm³ nos valores de massa específica das argamassas industrializadas disponíveis no mercado. Tem-se, desta forma, uma variação de até 15,2% na massa unitária e 8,2% na massa específica entre as amostras.

Em relação às argamassas dosadas em laboratório, mostrou-se a hipótese de os finos preencherem os vazios deixados pela composição da argamassa referência devido à redução do índice de vazios nas argamassas AD-EVA e AD-SA.

4.1.4. Curvas granulométricas

De acordo com os ensaios de granulometria propostos no item 3.3.1.4 apresentam-se os resultados na Figura 70 (porcentagem retida) e na Figura 71 (porcentagem passante).

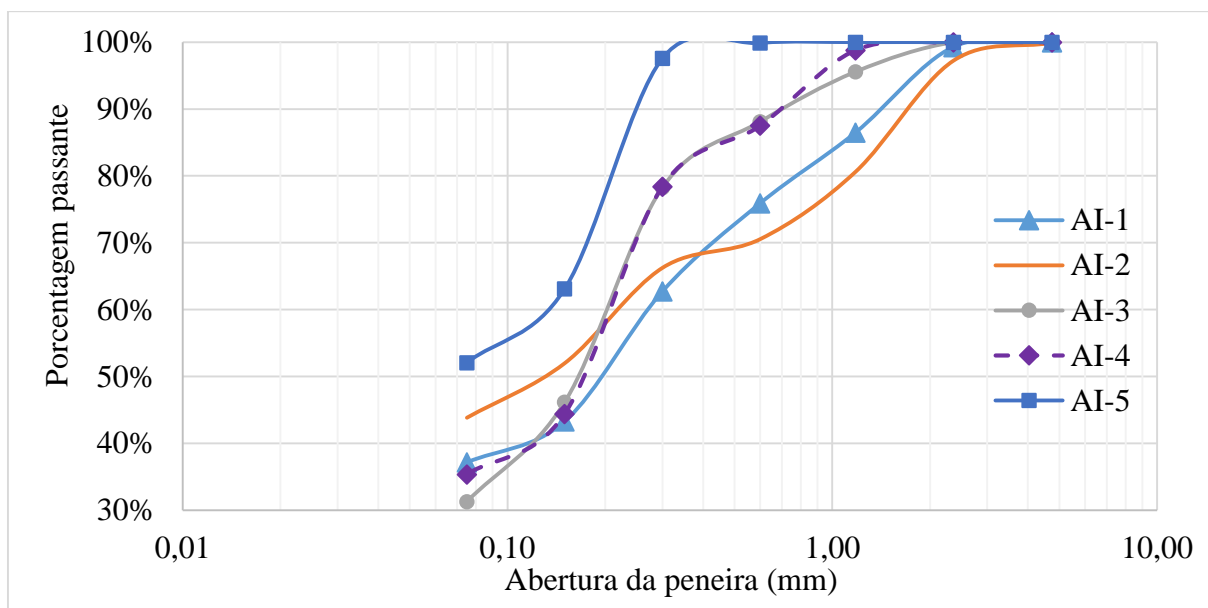
Figura 70 - Curvas granulométricas contínuas de porcentagem retida das argamassas industrializadas (fração grossa).



Fonte: O autor (2016).

Nota-se que um grupo de argamassas (AI-3, AI-4 e AI-5) apresenta um pico de retenção de grãos na peneira #100 (0,150 mm), sendo, inclusive, conforme Figura 72, a maior fração absoluta da argamassa AI-3.

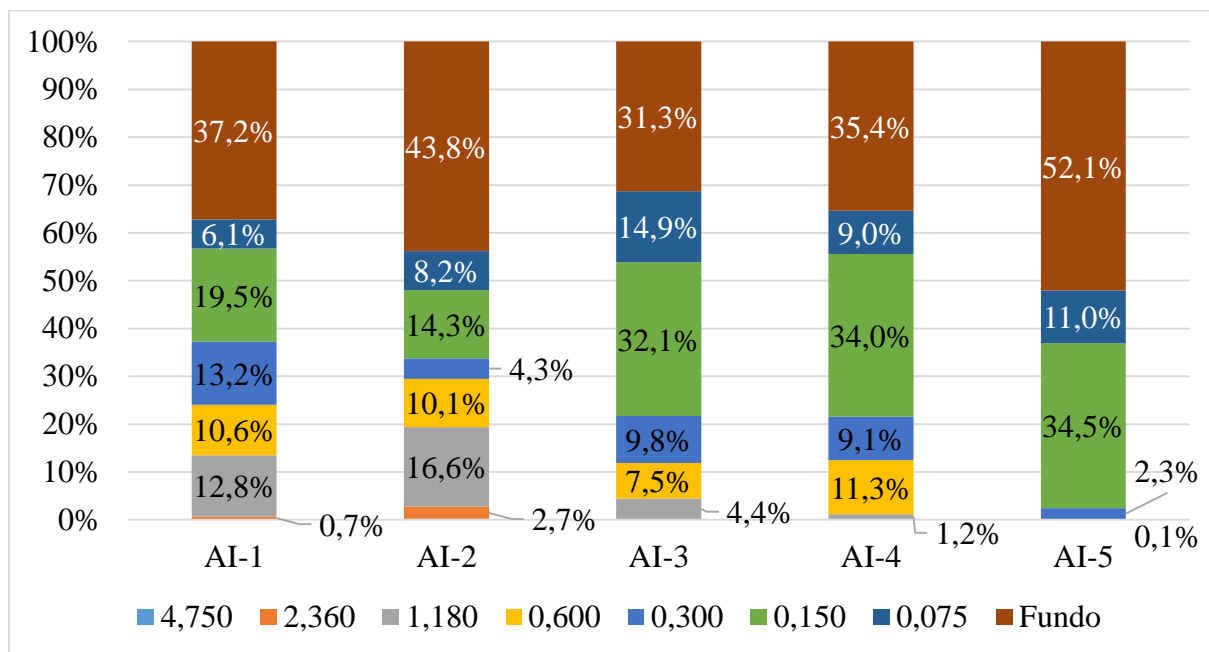
Figura 71 - Curvas granulométricas contínuas de porcentagem passante das argamassas industrializadas (fração grossa).



Fonte: O autor (2016).

O mesmo resultado de ensaios de granulometria da fração grossa pode ser observado na Figura 72 por distribuição discreta.

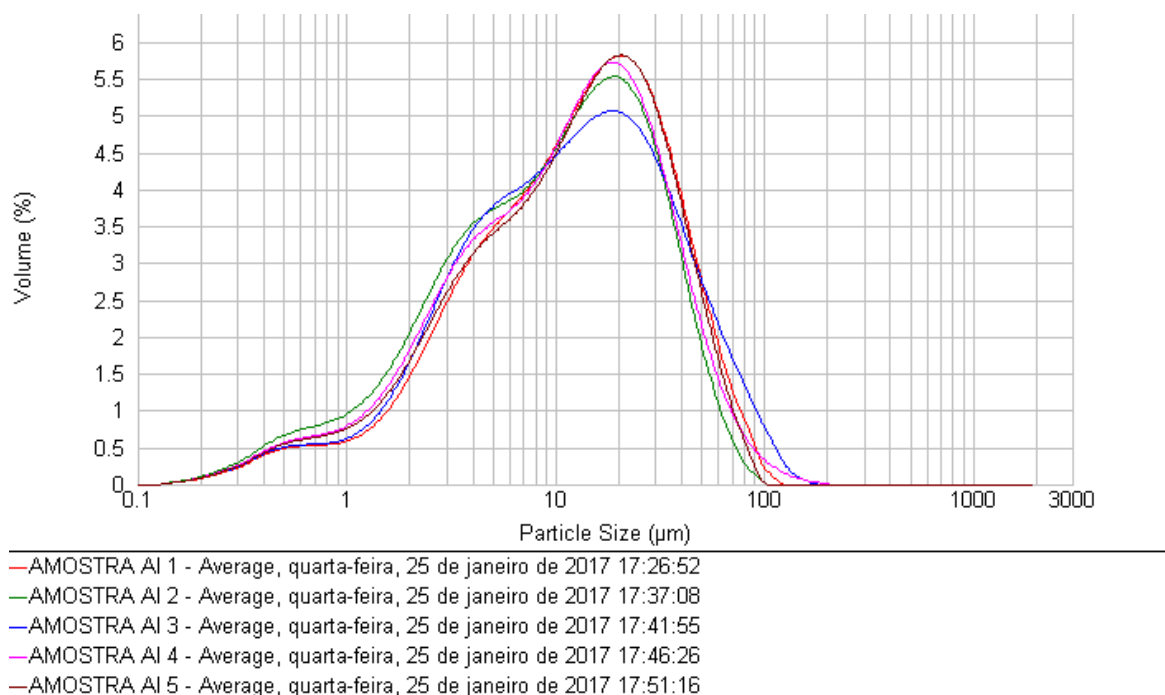
Figura 72 - Distribuição granulométrica discreta das argamassas industrializadas



Fonte: O autor (2016).

Os resultados obtidos pela análise de granulometria a laser estão apresentados na Figura 73.

Figura 73 – Curvas de distribuição granulométrica comparativa entre amostras

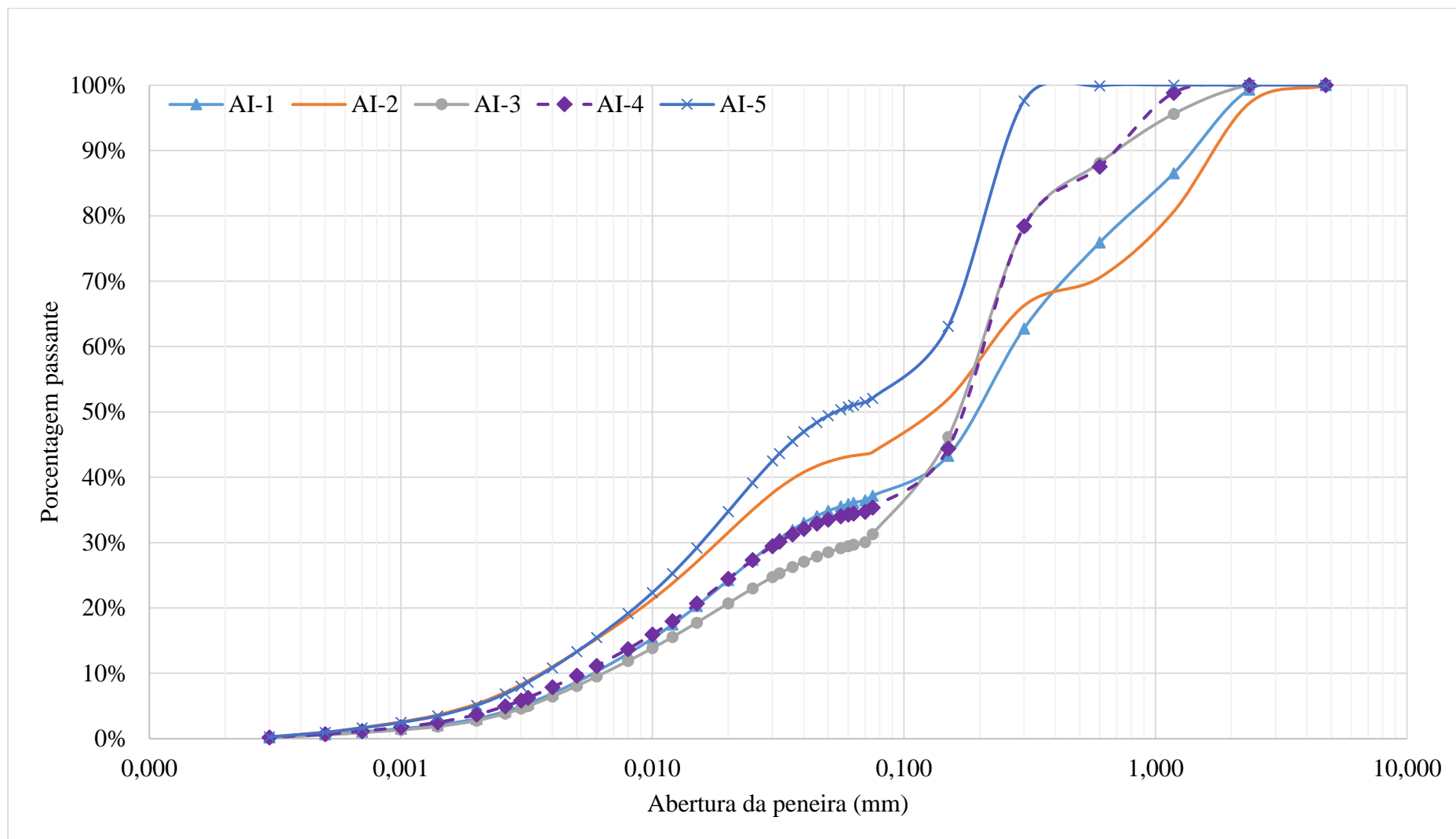


Fonte: Aplicativo operacional do equipamento (2016).

As curvas granulométricas se apresentaram bastante semelhantes na distribuição de partículas finas, sendo a particularidade mais evidente notada é a diminuição do pico de volume da argamassa AI-3 das partículas de aproximadamente 20 μm . Nota-se também que a argamassa AI-2 se sobressai na quantidade de partículas mais finas, entre 0,4 e 4,0 μm , com consequente diminuição no volume de partículas maiores que 10 μm .

A partir dos ensaios de granulometria, apresenta-se as curvas granulométricas completas na Figura 74. Nota-se que as argamassas que apresentam distribuição granulométrica melhor distribuídas são as AI-1 e AI-2, portanto, devem apresentar melhores resultados nos ensaios de estado fresco e aderência devido a melhor condição de preenchimento de vazios.

Figura 74 - Curvas granulométricas completas das argamassas industrializadas.



Fonte: O autor (2016).

4.1.1. Análise química

Os resultados de análise química para identificar frações solúveis e insolúveis no material anidro estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Teor solúvel e insolúvel das amostras anidras de argamassas de reparo industrializadas.

Argamassa	Fração solúvel (%)	Fração insolúvel (%)
AI-1	32,72	67,28
AI-2	38,88	61,12
AI-3	25,77	74,23
AI-4	26,12	73,88
AI-5	47,55	52,45

Fonte: O autor (2016).

Apesar da impossibilidade de se separar elementos entre as frações com os ensaios realizados neste trabalho, pode-se estimar, dentro da fração insolúvel, o teor de fíler na argamassa através dos resultados de granulometria que serão discutidos a seguir.

Na avaliação da composição química por FRX foi levantada a questão do cimento da argamassa AI-4 ser do tipo CP II-F pela alta perda de massa ao fogo e também pela estimativa do teor de fíler determinado pela análise química. Pode-se levantar esta questão com a obtenção de baixa resistência nas primeiras idades nos ensaios de resistência mecânica, o que elimina a possibilidade de ser um cimento de alta resistência inicial.

O teor de fíler pode ser estimado, assumindo que é um material fino insolúvel. Esta é uma estimativa aproximada e, para se confirmar, demanda ensaios mais apropriados. Tomando como base a quantidade de material solúvel na análise química (aglomerantes e aditivos) e subtraindo o teor de finos determinado por granulometria (aglomerantes, aditivos e fíler), estima-se a quantidade de fíler. Os cálculos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Estimativa do teor de fíler na composição das argamassas industrializadas.

Argamassa	Teor de finos (%)	Fração solúvel (%)	Teor de fíler (%)
AI-1	37,16	32,72	4,44
AI-2	43,83	38,88	4,95
AI-3	31,29	25,77	5,52
AI-4	35,37	26,12	9,25
AI-5	52,08	47,55	4,53

Fonte: O autor (2016).

Da mesma forma, pode-se dizer que tanto AI-1 quanto AI-2 são compostas por cimento CP V-ARI, tanto pelo valor de perda ao fogo característico quanto pela alta resistência mecânica inicial.

Por sua vez, AI-5, que apresentou baixa resistência inicial e baixa perda ao fogo, porém alto teor de óxido de alumínio e de ferro, pode contar em sua composição com um cimento de adição pozzolânica (CP II-Z), apesar da baixa quantidade de óxido de silício em relação às outras amostras – já que é possível que estas contenham adição de sílica ativa na composição. Além disso, o não endurecimento nas primeiras idades elimina a possibilidade da presença de CP V-ARI na sua composição.

A argamassa AI-3, que possui baixa perda ao fogo, baixa resistência inicial e poucos traços de componentes pozzolânicos, pode ser composta pelo cimento com adição de escória de alto forno (CP II-E), que tem a característica de liberar pouco calor na hidratação e causar baixa retração, o que condiz com o resultado obtido no ensaio de variação dimensional.

Da mesma forma que se estimou a quantidade de fíler, pode-se estimar a quantidade de cimento e outros componentes aglomerantes e de agregados das argamassas. Sendo a fração solúvel a própria quantidade de aglomerantes e aditivos da mistura, a fração insolúvel menos o teor de fíler é a quantidade estimada de agregados.

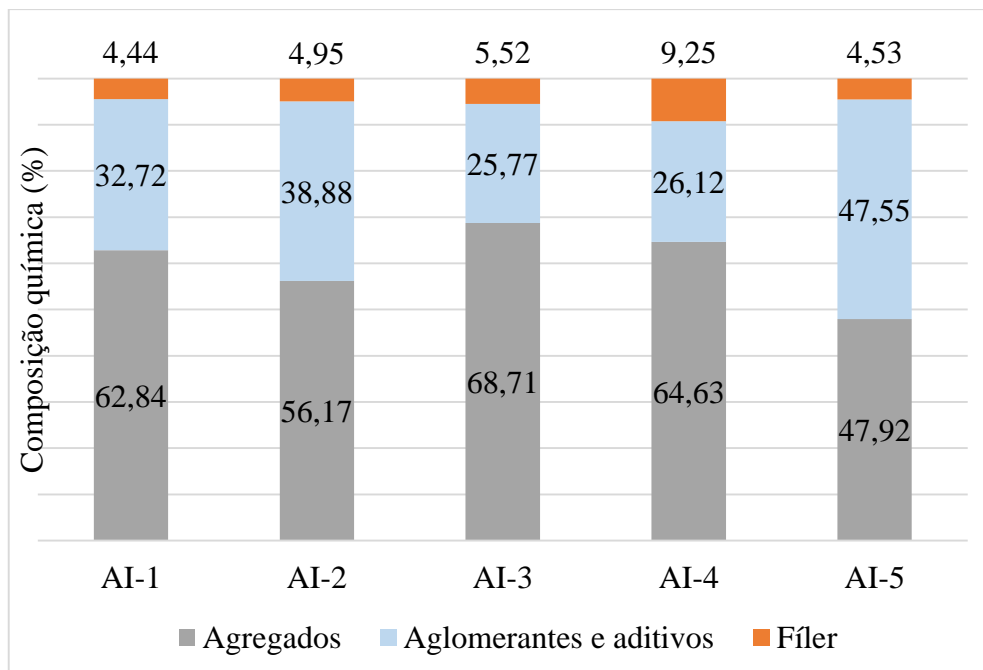
Pode-se então sintetizar a estimativa de composição química no quadro Quadro 15 e representar graficamente na Figura 75.

Quadro 15 – Quantidade de cimento estimadas para as argamassas industrializadas.

Argamassa	Aglomerantes + aditivos (%)	Fíler (%)	Agregados (%)
AI-1	32,72	4,44	62,84
AI-2	38,88	4,95	56,17
AI-3	25,77	5,52	68,71
AI-4	26,12	9,25	64,63
AI-5	47,55	4,53	47,92

Fonte: O autor (2016).

Figura 75 - Estimativa das frações constituintes das argamassas industrializadas baseadas nas análises químicas e granulometria



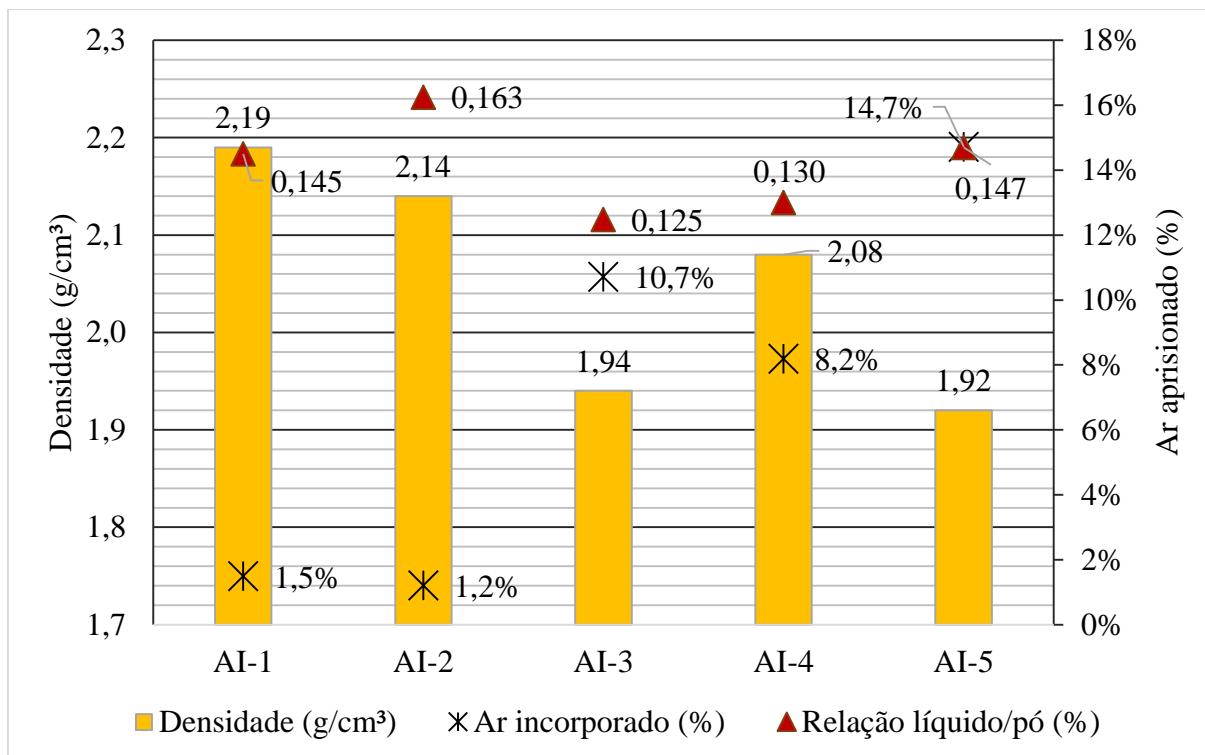
Fonte: O autor (2016).

4.2. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

4.2.1. Densidade e teor de ar aprisionado no estado fresco

As argamassas industrializadas apresentaram resultados de densidade variando entre 1,92 e 2,19 g/cm³ e ar incorporado variando entre 1,2% a 14,7%. Isto significa uma variação de até 14% em relação à densidade e, quanto ao ar incorporado, de 12,25 vezes a argamassa de menor valor. As argamassas AI-1 e AI-2, que apresentaram as curvas granulométricas mais contínuas, aprisionaram menos ar do que as demais. Os valores de densidade e ar aprisionado estão graficamente apresentados na Figura 76.

Figura 76 – Densidade e teor de ar aprisionado das argamassas industrializadas em estado fresco

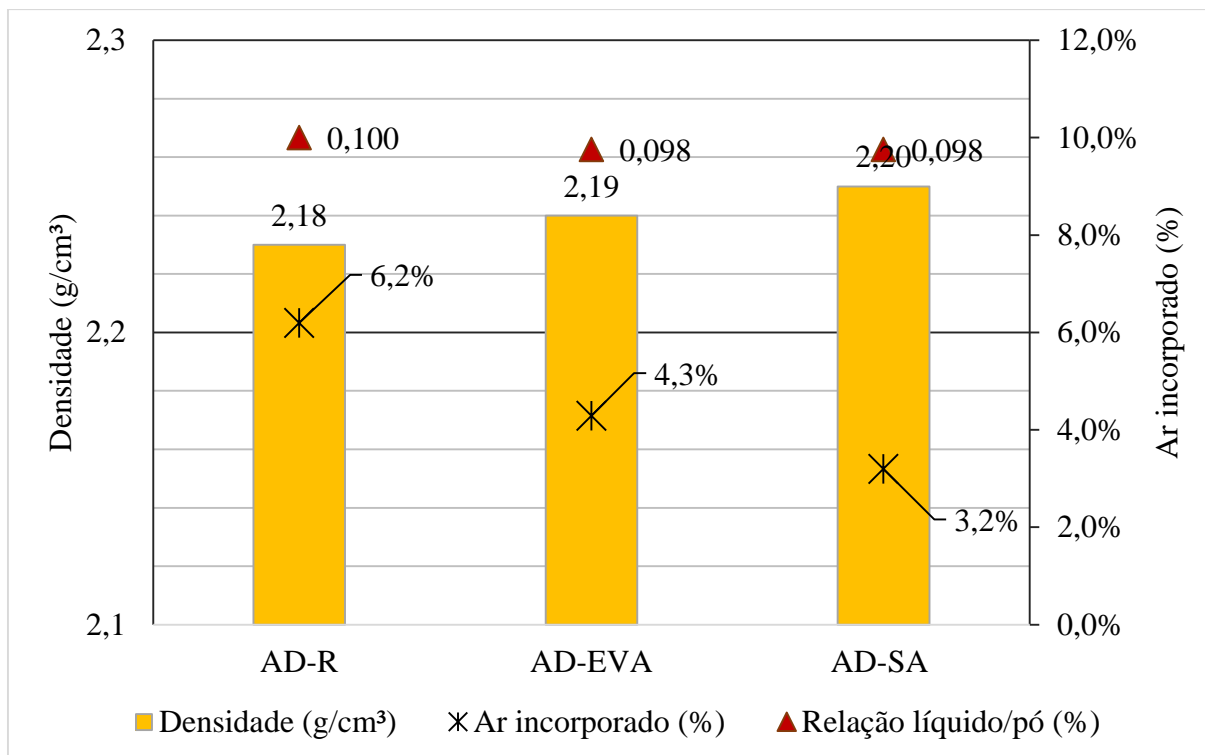


Fonte: O autor (2016).

Argamassas com altos teores de finos, ou seja, com teores de pasta maiores tendem a incorporar menos ar na mistura, desde que com fluidez adequada. A argamassa AI-5, que possui o maior teor de finos e, conseqüentemente, maior teor de pasta, e ainda assim incorporou mais ar entre as amostras, pode ter sido formulada com aditivo incorporador de ar em sua composição.

Com relação às argamassas dosadas em laboratório, os resultados de densidade se apresentaram praticamente idênticos entre si, conforme mostra a Figura 77, indicando que a adição de materiais finos não impacta fortemente na densidade em estado fresco. Com relação ao ar aprisionado na mistura, nota-se que a adição de 10% de EVA na composição diminuiu o teor em 31%, enquanto que a adição de sílica ativa reduziu este teor em mais de 48% em comparação com a amostra de referência.

Figura 77 – Densidade e teor de ar aprisionado das argamassas dosadas em laboratório em estado fresco.



Fonte: O autor (2016).

De posse dos dados de densidade e ar aprisionado, pode-se determinar o rendimento de utilização de cada argamassa, baseado no estudo de Medeiros (2002), segundo a equação (25):

$$R = \frac{1 + RLP}{d} \quad (25)$$

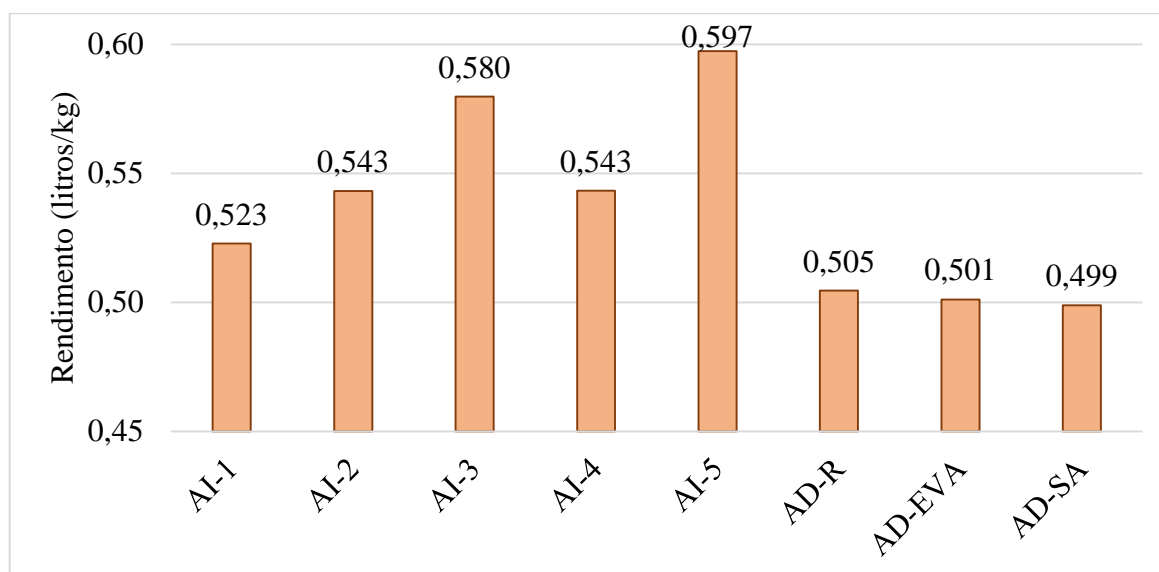
Onde:

R = rendimento da argamassa anidra (em litros/kg);

RLP = relação líquido/pó;

d = densidade da argamassa em estado fresco (em g/cm³, equivalente a kg/litro);

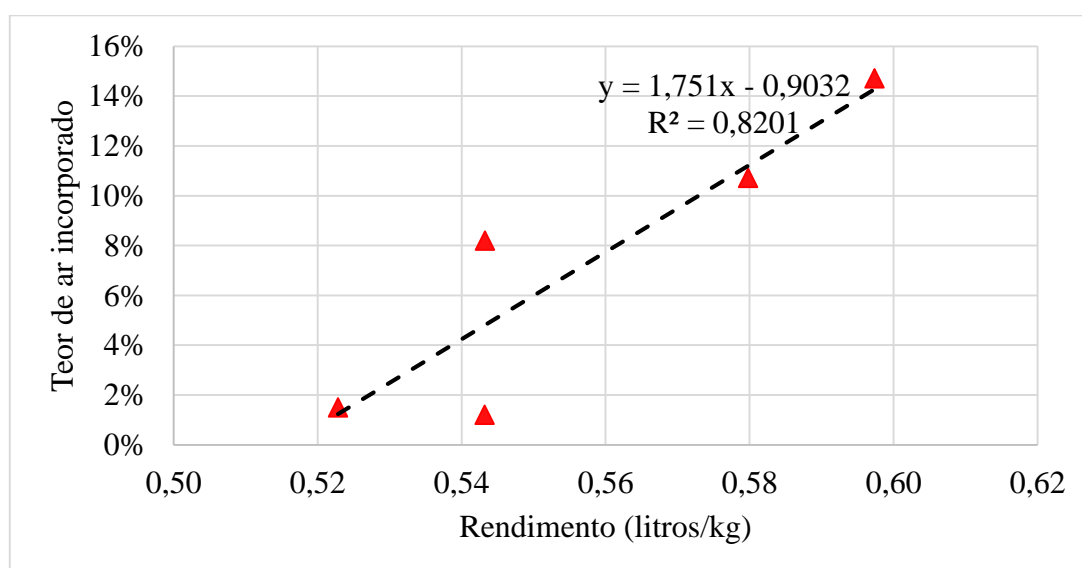
Os resultados de rendimento das argamassas estão apresentados na Figura 78. O rendimento médio entre as argamassas industrializadas deste estudo resultou em 0,56 litros/kg, aproximadamente a mesma média do estudo de Medeiros (2002), mostrando que desde a época do trabalho em questão, não houve alteração no comportamento dos produtos neste sentido.

Figura 78 - Rendimento de utilização das argamassas

Fonte: O autor (2016).

Nota-se claramente o rendimento maior das argamassas industrializadas em comparação com as dosadas em laboratório, mesmo com maior aprisionamento de ar nas amostras dosadas em relação a AI-1 e AI-2.

Dentre as argamassas industrializadas, a correlação entre o rendimento e o teor de ar aprisionado é apresentado na Figura 79 e apresenta um fator de correlação de 0,8201, bastante próximo ao obtido por Medeiros (2002) de 0,81. Este fator corrobora o estudo de Mattana *et al* (2012), citado em 3.3.2.

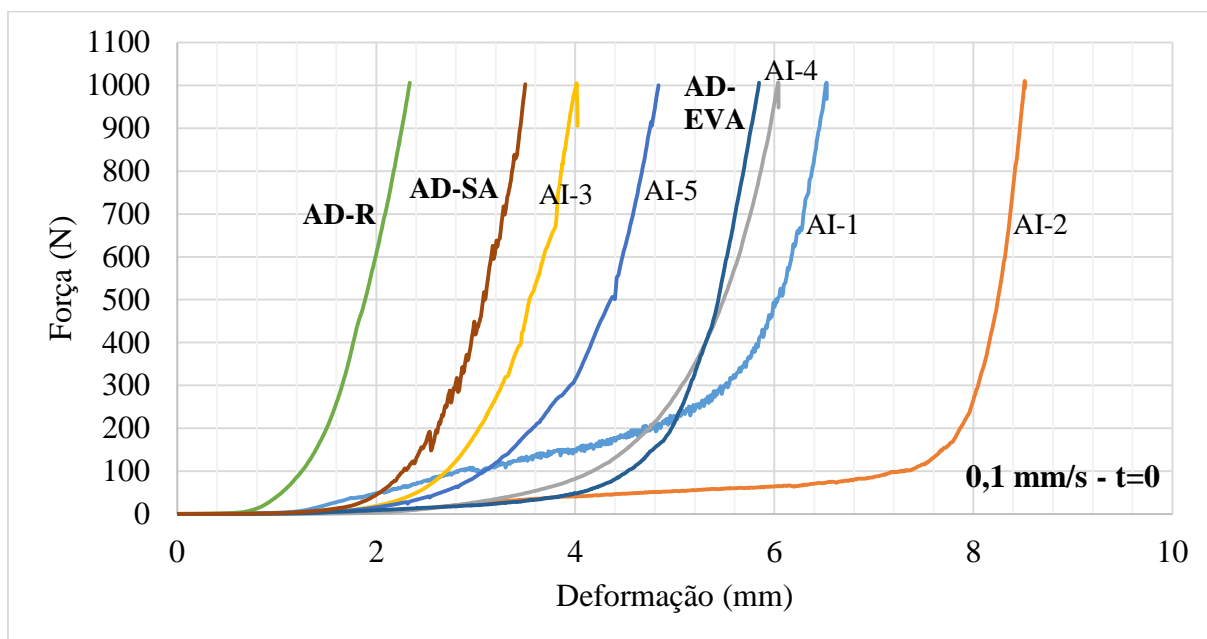
Figura 79 - Correlação entre o rendimento e o teor de ar aprisionado.

Fonte: O autor (2016).

4.2.2. Ensaios de *squeeze-flow*

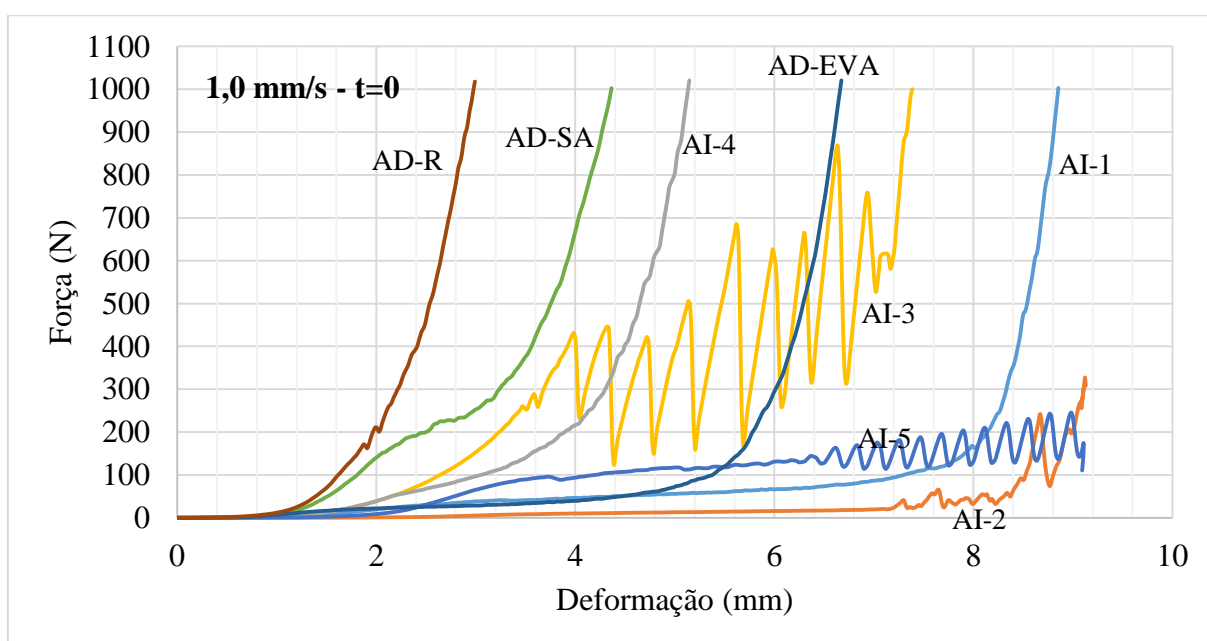
As curvas de resultados dos ensaios de *squeeze-flow* podem ser vistos na Figura 80 até a Figura 85.

Figura 80 - Curvas do ensaio de *squeeze-flow* realizado imediatamente ao final da mistura em velocidade de 0,1 mm/s



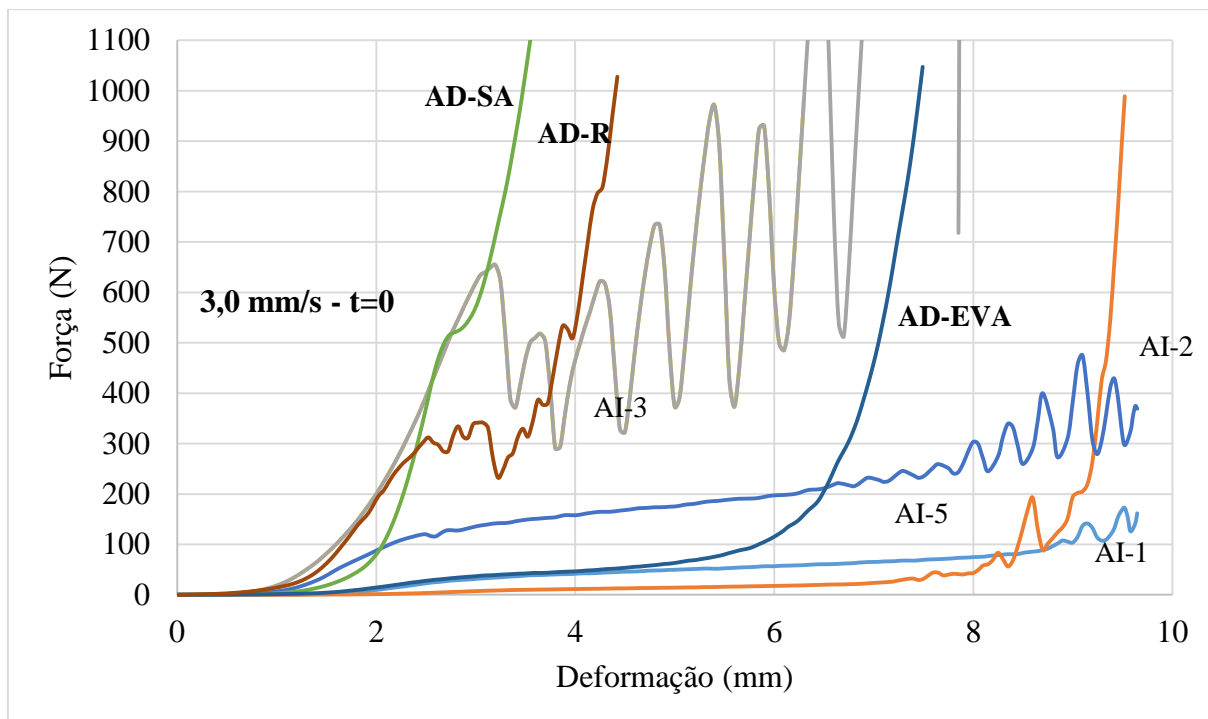
Fonte: O autor (2016).

Figura 81 - Curvas do ensaio de *squeeze-flow* realizado imediatamente ao final da mistura em velocidade de 1,0 mm/s.



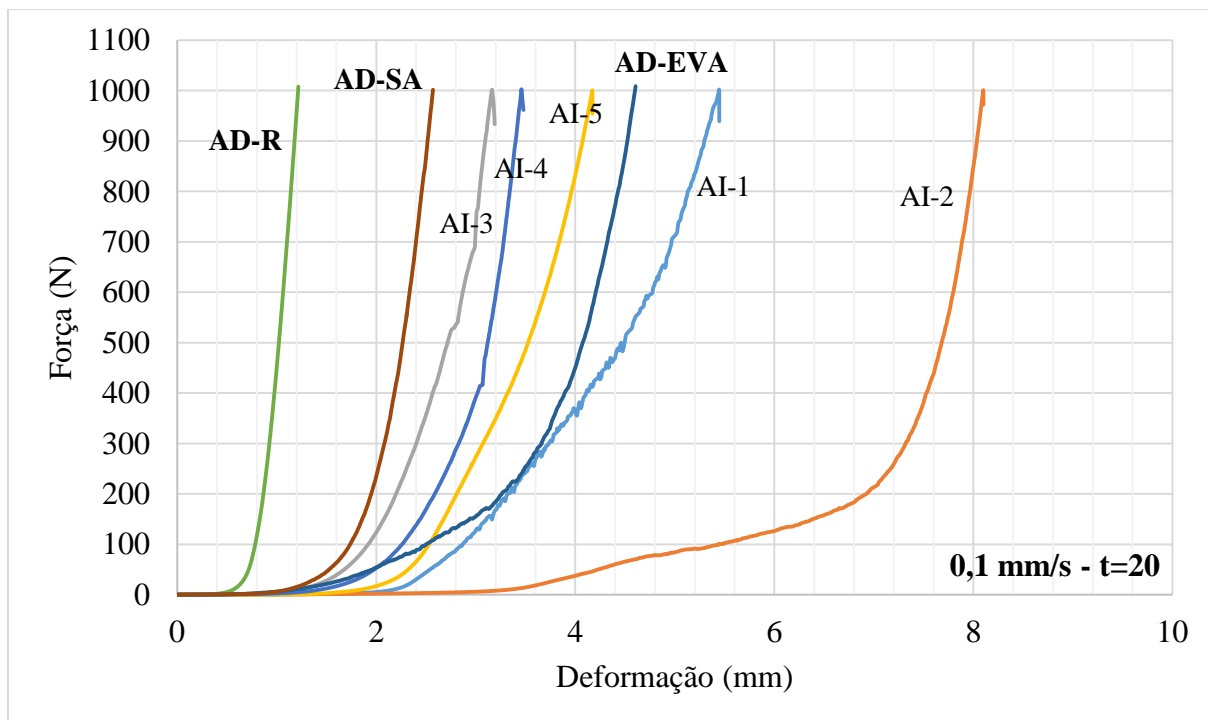
Fonte: O autor (2016).

Figura 82 - Curvas do ensaio de *squeeze-flow* realizado imediatamente ao final da mistura em velocidade de 3,0 mm/s.



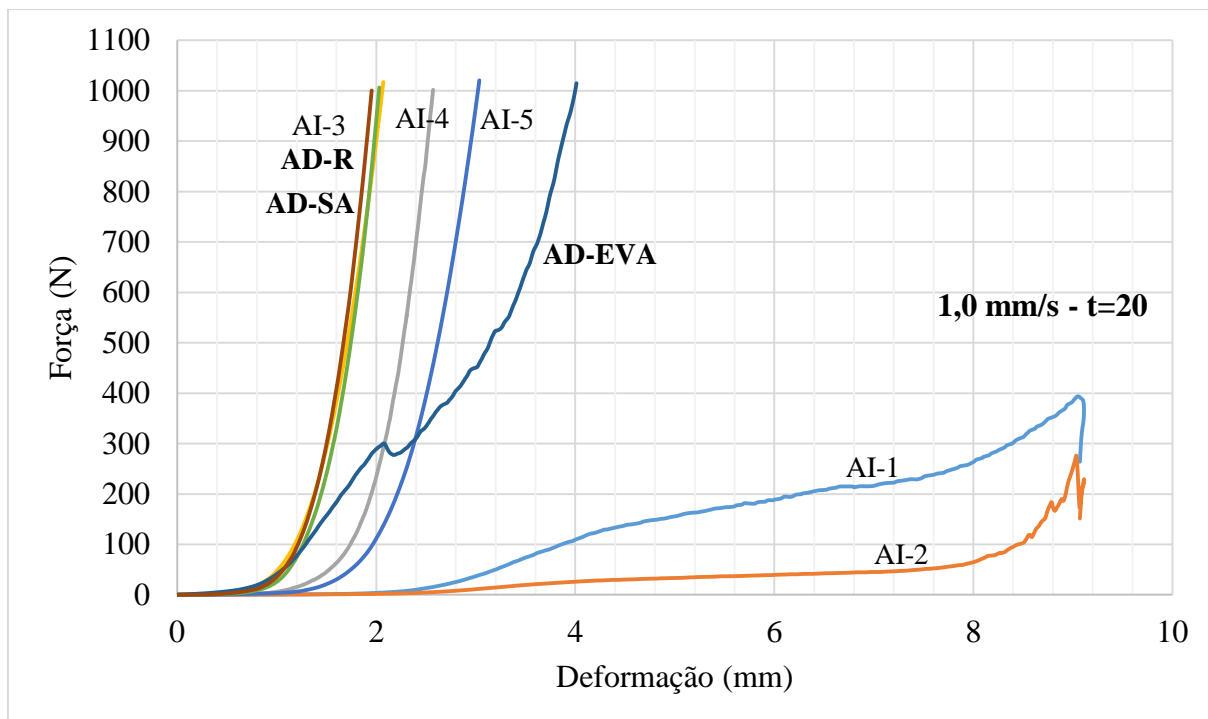
Fonte: O autor (2016).

Figura 83 - Curvas do ensaio de *squeeze-flow* realizado 20 minutos após a mistura em velocidade de 0,1 mm/s



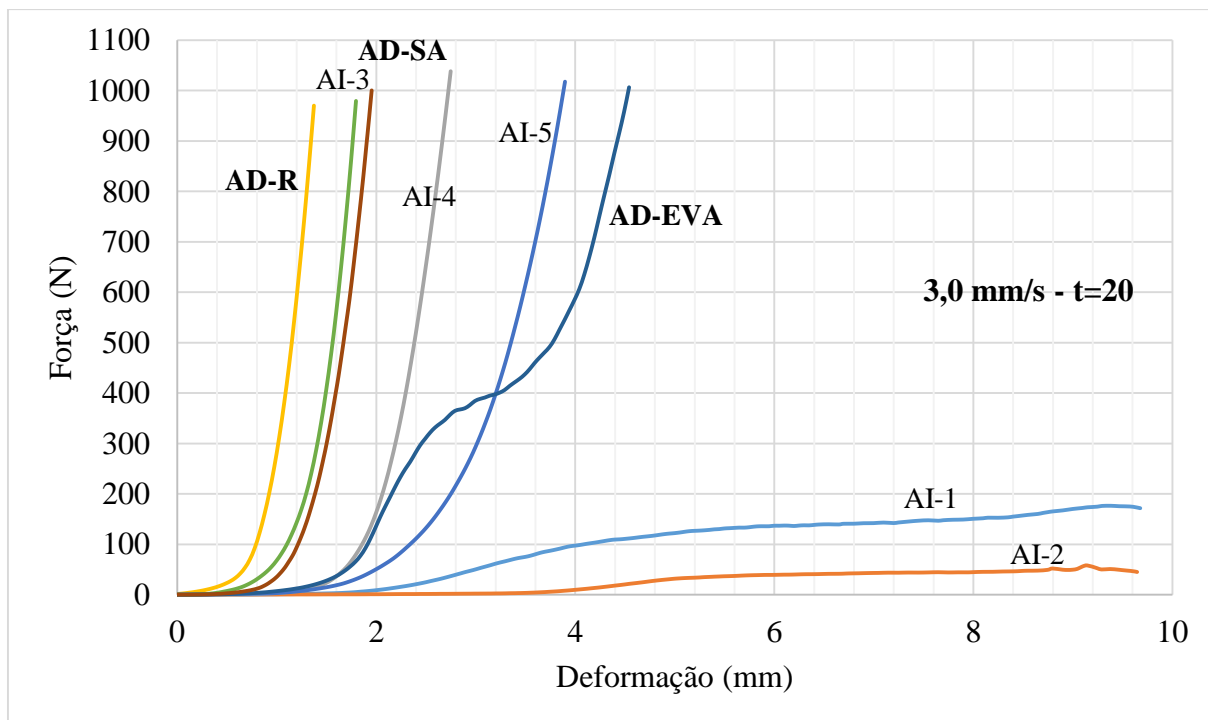
Fonte: O autor (2016).

Figura 84 - Curvas do ensaio de *squeeze-flow* realizado 20 minutos após a mistura em velocidade de 1,0 mm/s



Fonte: O autor (2016).

Figura 85 - Curvas do ensaio de *squeeze-flow* realizado 20 minutos após a mistura em velocidade de 3,0 mm/s



Fonte: O autor (2016).

Pode-se notar que, para o ensaio em tempo imediato, a exceção das argamassas AI-1 e AI-2, as outras argamassas possuem comportamentos semelhantes quando submetidas ao ensaio, variando apenas a capacidade de deformação final. Ao final de um repouso de 20 minutos, a argamassa AI-2 praticamente manteve seu comportamento inicial, ao contrário da AI-1, que tendeu a se aproximar das outras argamassas.

Chama a atenção a argamassa AI-3, quando o ensaio entra na zona de entrelaçamento de partículas (zona III). A curva traçada no ensaio à velocidade de 1,0 mm/s apresentou forte ruído nesta zona. Isto pode ser explicado pelo fato desta argamassa apresentar pouca quantidade de pasta, conforme evidenciado nos ensaios de granulometria, o que pode levar a uma acomodação mais desordenada das partículas sob alta taxa de deformação. As argamassas AI-2 e AI-5 também apresentaram ruído ao fim do ensaio nesta velocidade, bem como a argamassa AI-1 apresentou ruídos menores desde a zona plástica do ensaio (zona II) para a velocidade de 0,1 mm/s. Como a presença de fibras macroscópicas é o fator comum entre estas três argamassas, os ruídos podem ser consequência do seu efeito no comportamento reológico das amostras.

A granulometria é um fator de impacto no comportamento reológico. Conforme citado por Costa (2006) um maior teor de pasta proporciona maior envolvimento e lubrificação das partículas mais grossas, diminuindo a interação destes por contato. Esta questão foi muito bem observada neste estudo, pois, com exceção de AI-5, as argamassas com maior teor de finos obtiveram os comportamentos reológicos mais fluidos. O resultado discrepante de AI-5 pode ser explicado pela análise química, que mostrou baixo teor de material fino insolúvel, apesar da alta quantidade de finos no geral.

A inclusão de polímero EVA na argamassa de reparo levou a uma melhora significativa na deformabilidade para todas as taxas de cisalhamento avaliadas. Isto pode ser explicado pelo efeito de rolamento entre partículas que corrobora o estudo de Su (1995). Em contrapartida, a adição de sílica ativa na mistura apresentou melhora pouco significativa na deformabilidade das amostras.

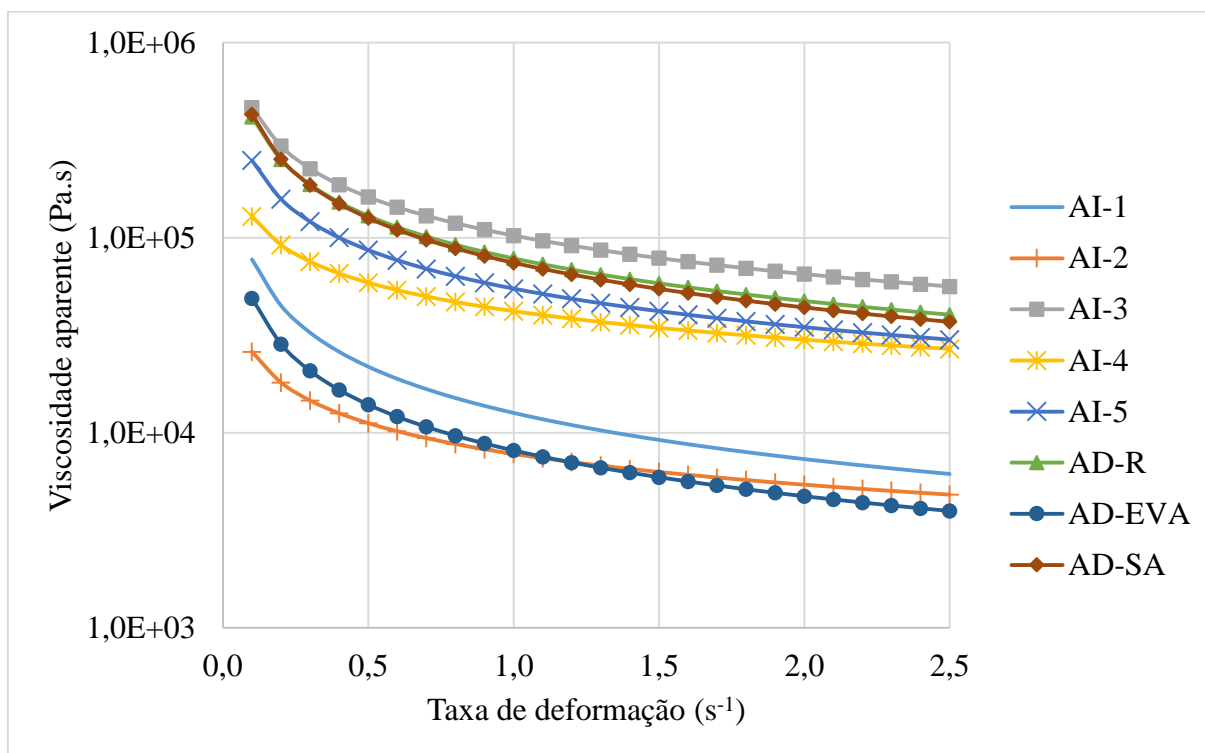
Por fim, a análise das curvas de *squeeze-flow* indicam um melhor comportamento reológico quando as argamassas são solicitadas a uma taxa de 1,0 mm/s e com aplicação de carga imediatamente após a mistura.

4.2.3. Viscosidade e taxa de deformação

A partir dos ensaios de *squeeze-flow* e da aplicação destes ensaios na teoria deduzida nas equações (7), (8) e (9), pode-se construir as curvas de viscosidade aparente e taxa de deformação elongacional de cada amostra, bem como as curvas de tensão de cisalhamento e taxa de deformação apresentadas no apêndice B, tornando possível a obtenção experimental da viscosidade de cada material, comparando as curvas experimentais com a equação (3).

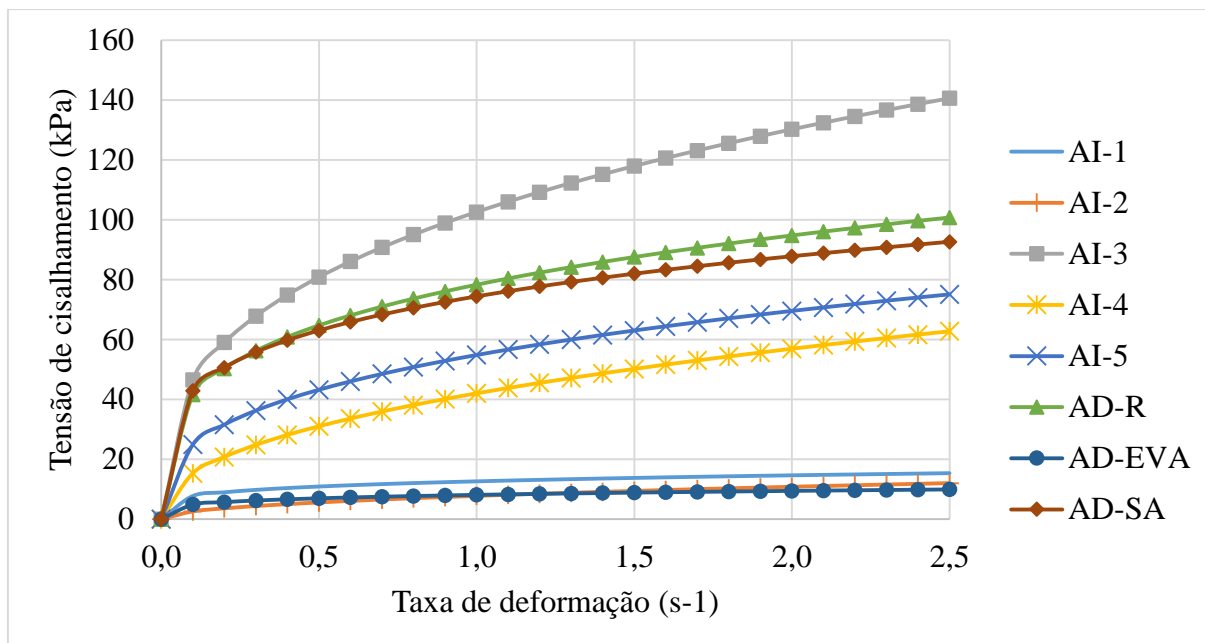
As curvas de viscosidade aparente e tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação comparativas de cada argamassa para o tempo zero, ou seja, ensaiadas imediatamente após a mistura, são apresentadas na Figura 86 a Figura 88.

Figura 86 – Curvas de viscosidade aparente das argamassas estudadas para tempo zero.



Fonte: O autor (2016).

Figura 87 - Curvas de tensão de cisalhamento das argamassas estudadas para tempo zero.



Fonte: O autor (2016).

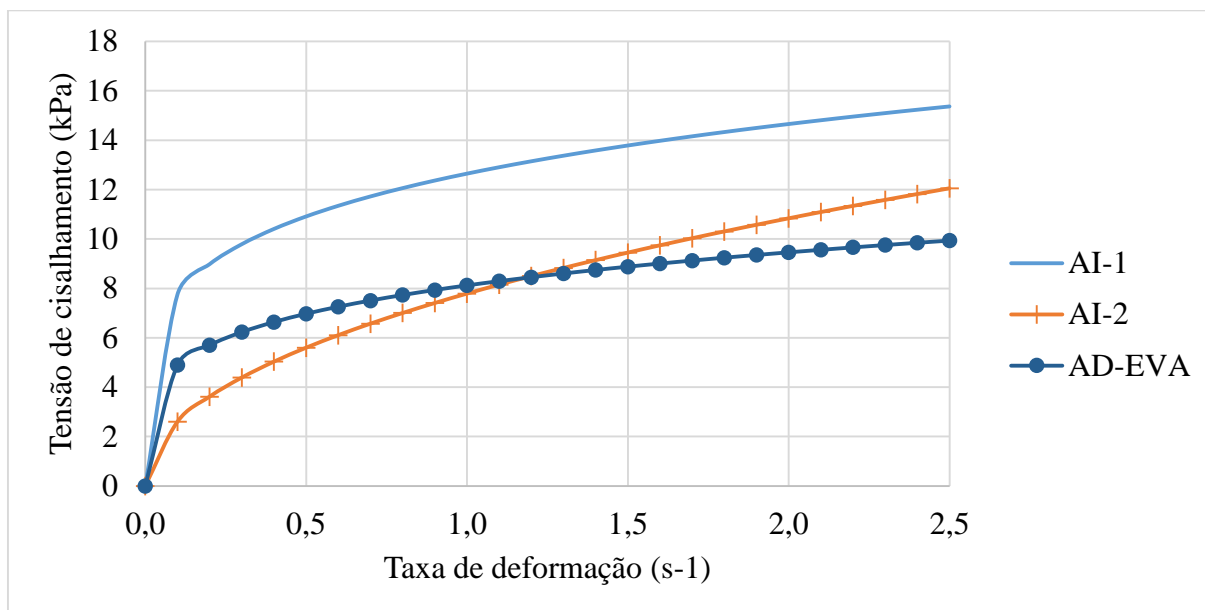
Nota-se a partir das curvas que a viscosidade das argamassas diminui conforme a taxa de deformação, bem como há aumento da tensão de cisalhamento das amostras quando submetidas a taxas de deformação maiores, portanto estes materiais podem ser classificados como pseudoplásticos.

Da Figura 86 nota-se, que, guardado o fato de as argamassas apresentarem viscosidades aparentes diferentes, as perdas de viscosidade com o aumento da taxa de deformação acontecem de forma semelhante para todas as amostras.

Da Figura 87, chama a atenção a curva das argamassas AI-3, AI-4, AI-5, AD-R e AD-SA, que apresentaram viscosidade muito superior às outras amostras. Um segundo grupo formado por AI-1, AI-2 e AD-EVA tem viscosidade muito inferior às outras. A fim de melhor compreensão do comportamento das outras argamassas, a Figura 88 mostra as mesmas curvas, excluindo-se a curva das argamassas do primeiro grupo.

A partir da Figura 88 observa-se que a argamassa AI-2 apresenta a menor resistência ao cisalhamento para iniciar deformação, não necessitando de um pico de tensão para tal. Isto representa na prática um melhor comportamento desta argamassa quanto a recuperação por acúmulo de esforços na fase elástica por oferecer menor resistência ao esforço inicial de aplicação.

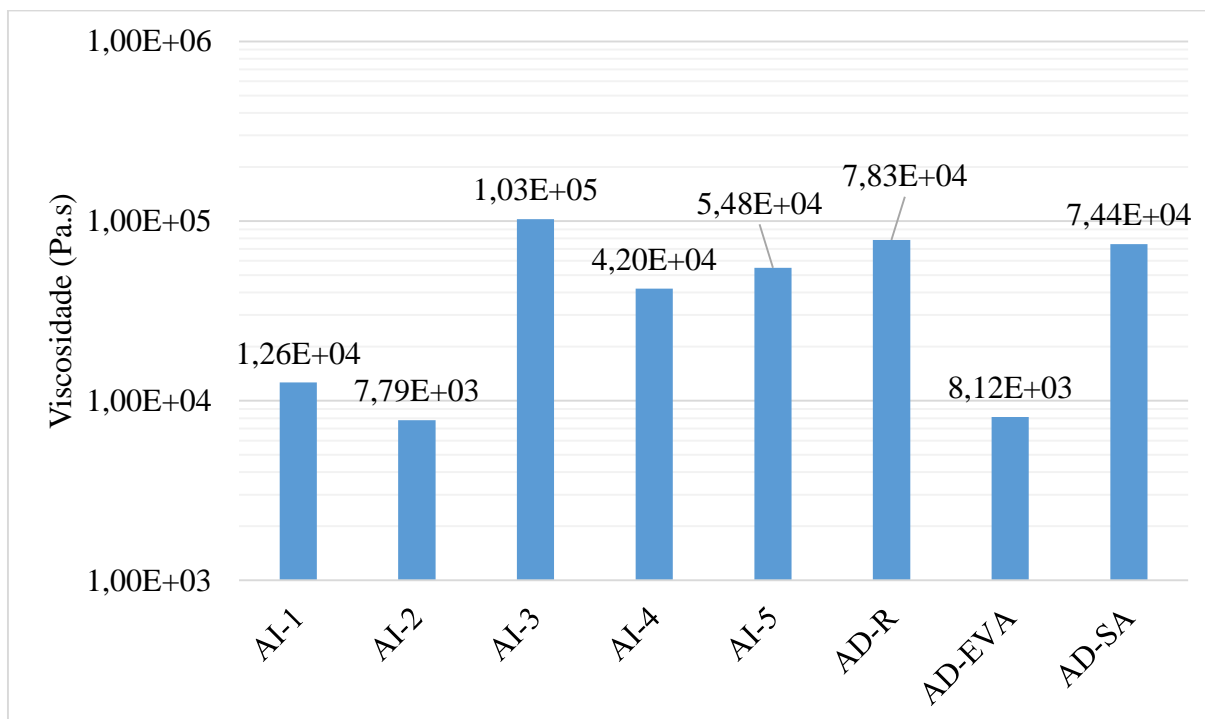
Figura 88 - Curvas de tensão de cisalhamento das argamassas AI-1, AI-2 e AD-EVA.



Fonte: O autor (2016).

A Figura 89 mostra o valor da viscosidade de cada uma das argamassas no tempo zero.

Figura 89 - Viscosidade das argamassas estudadas ao tempo zero.

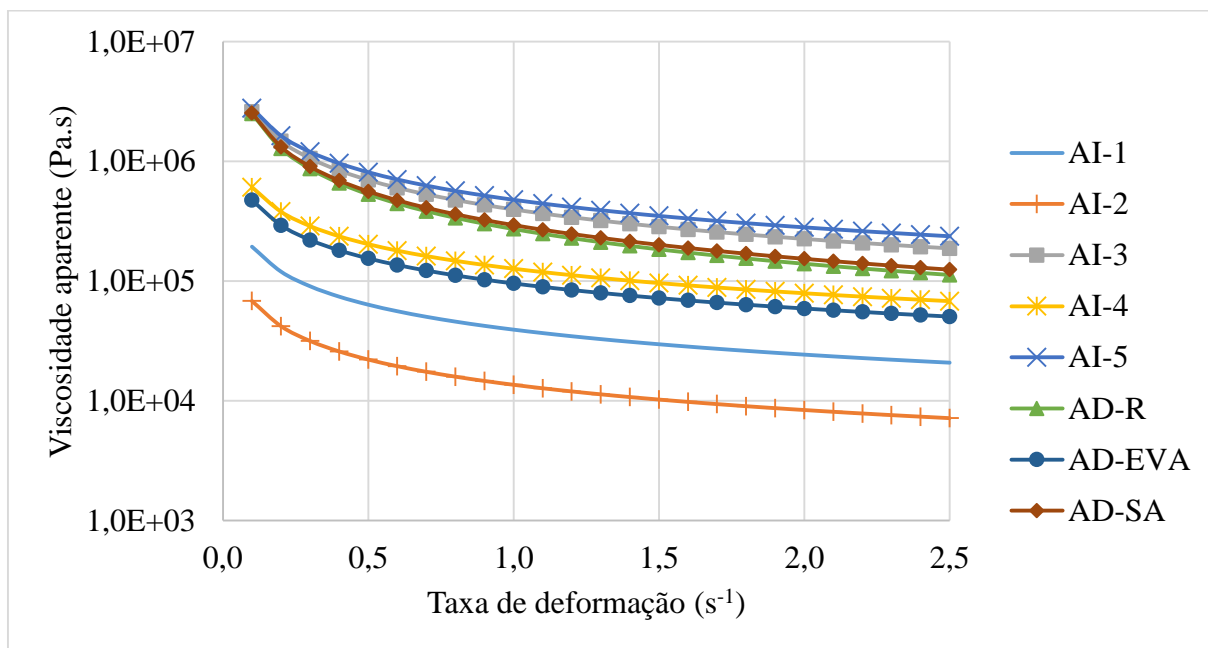


Fonte: O autor (2016).

Ao analisar as argamassas dosadas, pode-se dizer que a utilização de polímero EVA na mistura é um meio de reduzir a viscosidade da argamassa.

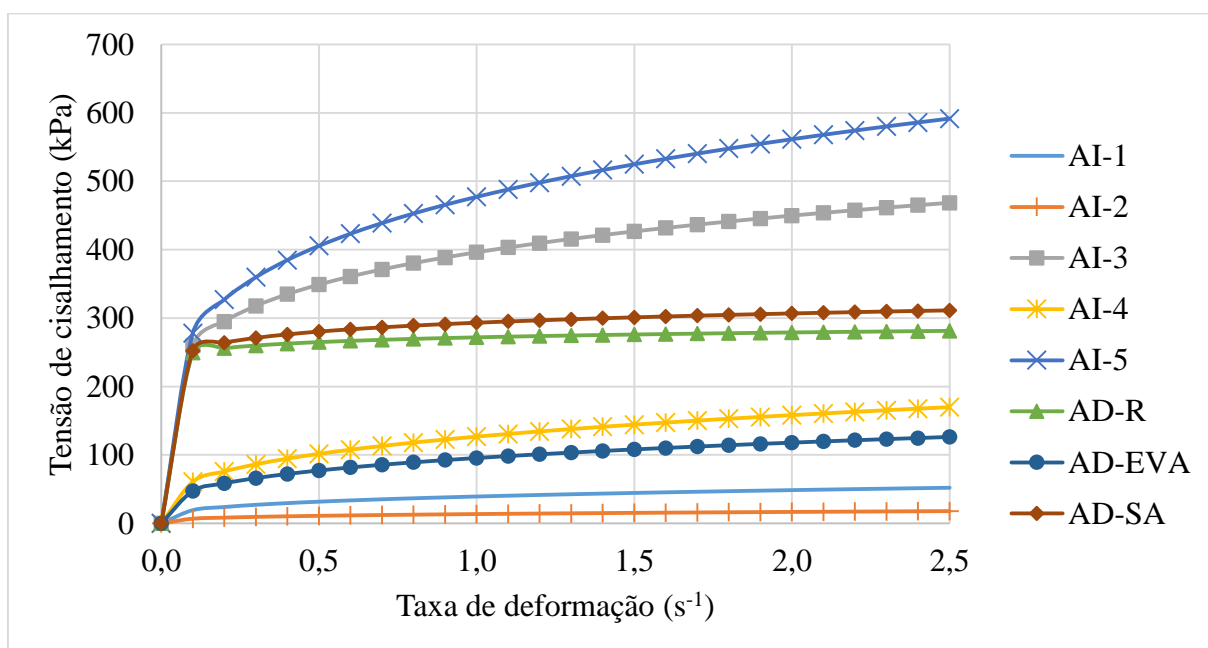
Para o tempo de 20 minutos após a mistura, as curvas de viscosidade aparente e tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação comparativas de cada argamassa são apresentadas na Figura 90 e na Figura 91.

Figura 90 - Curvas de viscosidade aparente das argamassas estudadas para um tempo de 20 minutos após a mistura.



Fonte: O autor (2016).

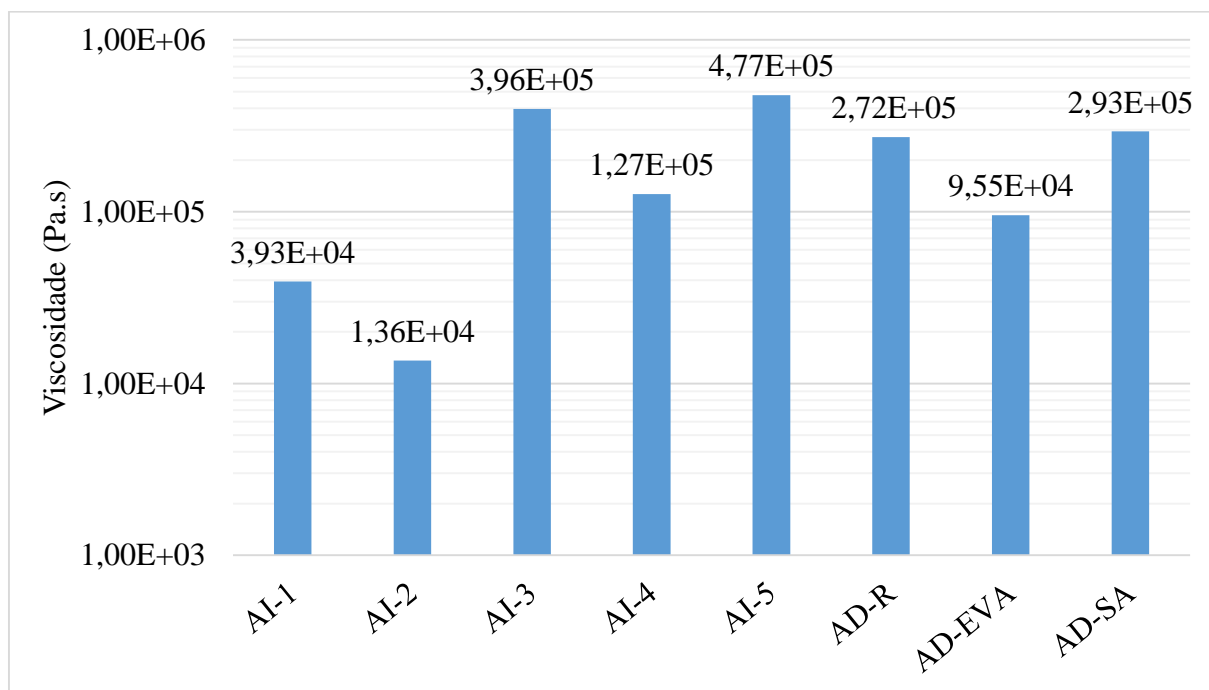
Figura 91 - Curvas de tensão de cisalhamento das argamassas estudadas para um tempo de 20 minutos após a mistura.



Fonte: O autor (2016).

Nota-se pelas figuras que há ganho de resistência à deformação em estado fresco para todas as argamassas estudadas, porém com mais acentuação na amostra de AI-5, que chegou a superar a resistência de AI-3. A Figura 92 mostra o valor da viscosidade de cada uma das argamassas no tempo de vinte minutos.

Figura 92 - Viscosidade das argamassas estudadas a um tempo de 20 minutos após a mistura.



Fonte: O autor (2016).

A Tabela 8 mostra a porcentagem de aumento na viscosidade das argamassas estudadas após o tempo de repouso da mistura.

Tabela 8 - Variação na viscosidade das argamassas estudadas após tempo de repouso de mistura de 20 minutos.

Argamassa	Viscosidade t=0 (Pa.s)	Viscosidade t=20 (Pa.s)	Aumento (%)
AI-1	12647	39271	211%
AI-2	7790	13600	75%
AI-3	102626	396185	286%
AI-4	42039	126787	202%
AI-5	54846	477181	770%
AD-R	78334	271893	247%
AD-EVA	8121	95503	1076%
AD-SA	74430	293247	294%

Fonte: O autor (2016).

Nota-se que o ganho de viscosidade mais acentuado foi da argamassa dosada com EVA (AD-EVA). Apesar do aumento mais significativo, continua tendo um bom comportamento de deformação, assim como as argamassas AI-1 e AI-4, que tiveram aumentos maiores que 100% mas mantiveram uma baixa taxa de cisalhamento para sua deformação.

Das argamassas dosadas, além do que já foi concluído sobre a funcionalidade do EVA nas características reológicas, os ensaios de *squeeze-flow* mostraram que a sílica ativa não alterou significativamente o comportamento reológico da argamassa com relação à amostra de referência para a mesma quantidade de água e aditivo superplastificante.

4.2.4. Tensão de escoamento

Cardoso, John e Pileggi (2009) propõem a obtenção da tensão de escoamento a partir da curva de ensaio de *squeeze-flow* de menor taxa de deformação por ser a situação que melhor simula uma condição estacionária da argamassa, que permite a determinação da camada máxima de argamassa a ser aplicada em um plano vertical (equação 26):

$$e_m = \frac{\sigma_0}{d \cdot g} \quad (26)$$

Onde:

e_m = espessura máxima da camada (em centímetros);

σ_0 = tensão de escoamento;

d = densidade da argamassa em estado fresco (em g/cm³, equivalente a kg/litro);

g = aceleração da gravidade (em g/cm³, equivalente a kg/litro);

Neste estudo, determinar-se-á as tensões de escoamento para cada taxa de cisalhamento a fim de compreender o comportamento reológico das amostras de forma mais completa. As tensões de escoamento obtidas graficamente estão apresentadas na Tabela 9 para os ensaios imediatamente após a mistura e na Tabela 10 para os ensaios 20 minutos após a mistura.

Tabela 9 – Tensão de escoamento das argamassas em ensaio imediatamente após a mistura (tempo zero).

Argamassa Velocidade (mm/s)	Tensão de escoamento (kPa)		
	0,1	1,0	3,0
AI-1	2,58	2,00	1,34
AI-2	1,78	0,99	0,77
AI-3	5,62	12,07	21,23
AI-4	1,77	1,75	7,05
AI-5	21,29	8,35	6,14
AD-R	27,91	8,81	12,80
AD-EVA	1,64	1,26	1,10
AD-SA	18,72	14,09	11,06

Fonte: O autor (2016).

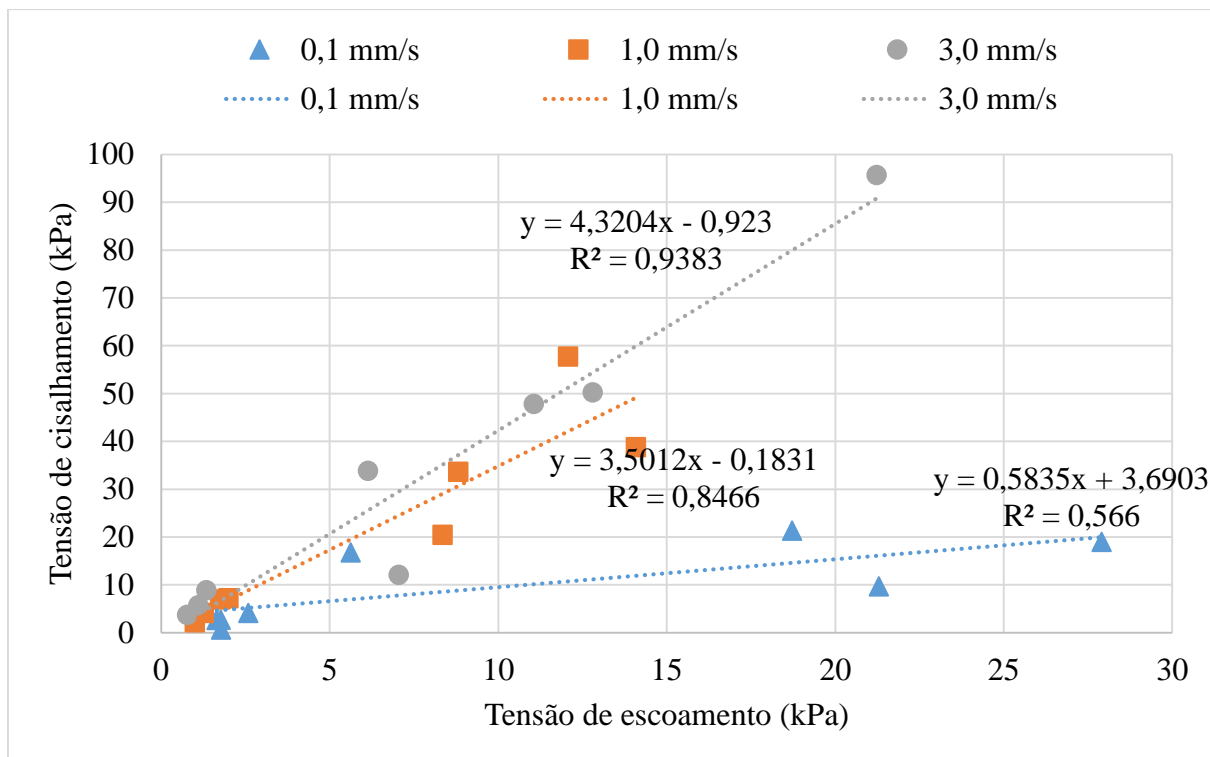
Tabela 10 – Tensão de escoamento das argamassas em ensaio 20 minutos após a mistura (tempo=20).

Argamassa Velocidade (mm/s)	Tensão de escoamento (kPa)		
	0,1	1,0	3,0
AI-1	10,08	8,50	4,53
AI-2	4,80	2,06	2,07
AI-3	25,87	29,02	29,27
AI-4	1,49	12,66	11,31
AI-5	20,95	23,16	10,34
AD-R	19,26	15,14	12,69
AD-EVA	4,99	3,82	2,56
AD-SA	15,36	12,25	10,90

Fonte: O autor (2016).

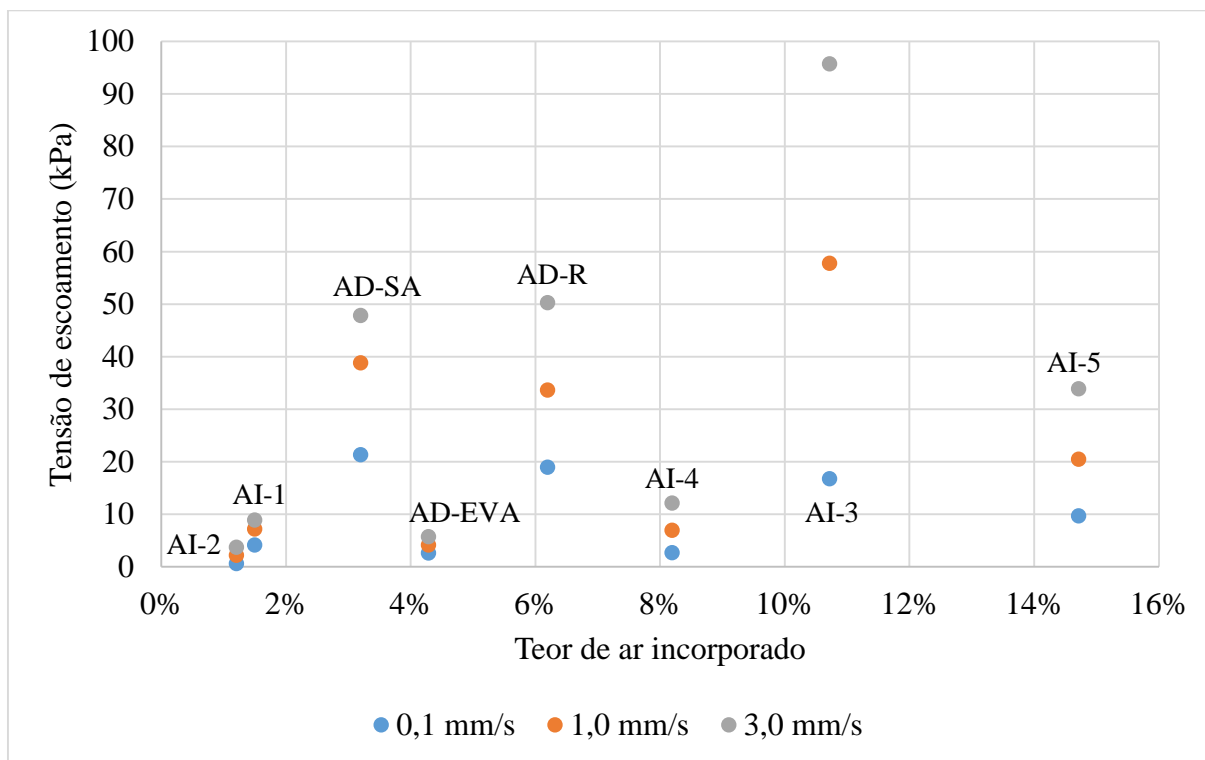
Ao correlacionar a tensão de escoamento com a tensão de cisalhamento no ponto de escoamento do fluido para as respectivas taxas de deformação para cada velocidade de ensaio (Figura 93), fica clara a forte correlação entre as tensões para taxas de deformação mais altas e um comportamento diferente para a taxa mais baixa. Isso mostra que o equilíbrio interno de tensões nas matrizes em estado fresco no ponto de escoamento acontece de forma mais eficiente quando este material sofre solicitações mais rápidas.

Figura 93 - Correlação entre tensão de escoamento e tensão de cisalhamento para amostras ensaiadas imediatamente após a mistura separadas por taxa de deformação.



Fonte: O autor (2016).

Analisando a tensão de escoamento com a quantidade de ar aprisionado (Figura 94), nota-se que existe a tendência de argamassas com maior capacidade de aprisionamento de ar apresentem maiores tensões de escoamento. É um resultado diferente do encontrado por Cardoso (2009) para argamassas de revestimento, que verificou através de reometria que um maior torque de escoamento acontecia em argamassas de menor teor de ar. A hipótese que explica este comportamento nas argamassas de reparo é o efeito lubrificante dos polímeros, notado a partir do resultado das argamassas dosadas. As amostras de AD-R e AD-SA, de argamassas exclusivamente cimentícias, apresentaram tensão maior para menor teor de ar, enquanto na argamassa AD-EVA, modificada com polímero EVA, ocorreu o inverso.

Figura 94 - Correlação entre teor de ar aprisionado e tensão de escoamento.

Fonte: O autor (2016).

4.2.5. Índice de consistência

As amostras de argamassas apresentaram os resultados de índice de consistência através do ensaio de *flow-table* mostrados no Quadro 16.

Quadro 16 - Índice de consistência das argamassas ao ensaio de *flow-table*.

Argamassa	Índice de consistência
AI-1	234
AI-2	248
AI-3	-
AI-4	214
AI-5	211
AD-R	215
AD-1	254
AD-2	208

Fonte: O autor (2016).

A argamassa AI-3 ao fim do ensaio apresentou a característica mostrada na Figura 95 que impossibilitou a avaliação da medida. Em geral, todas as outras amostras apresentaram

abatimentos semelhantes em aparência, como exemplificado na Figura 96, no caso, uma amostra da AI-1.

Figura 95 - Argamassa AI-3 ao fim do ensaio de flow-table



Figura 96 - Aparência característica das argamassas após ensaio de flow-table.

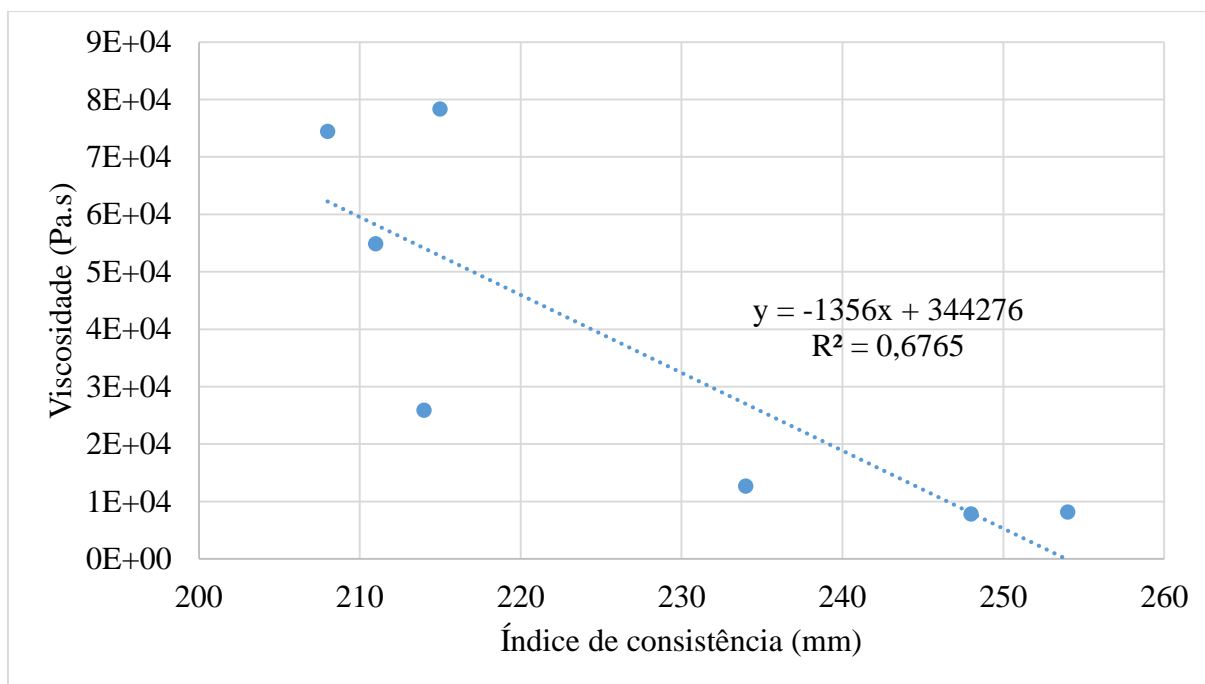


Dentre as argamassas industrializadas, as amostras apresentaram variação de 23% entre o maior e o menor índice de consistência. Estes valores são compatíveis com os resultados de deformabilidade apresentados nos ensaios de squeeze-flow.

Em se tratando das argamassas dosadas, nota-se que a adição de EVA se mostrou uma medida eficaz no aumento do espalhamento da argamassa, enquanto a adição da sílica obteve efeito inverso.

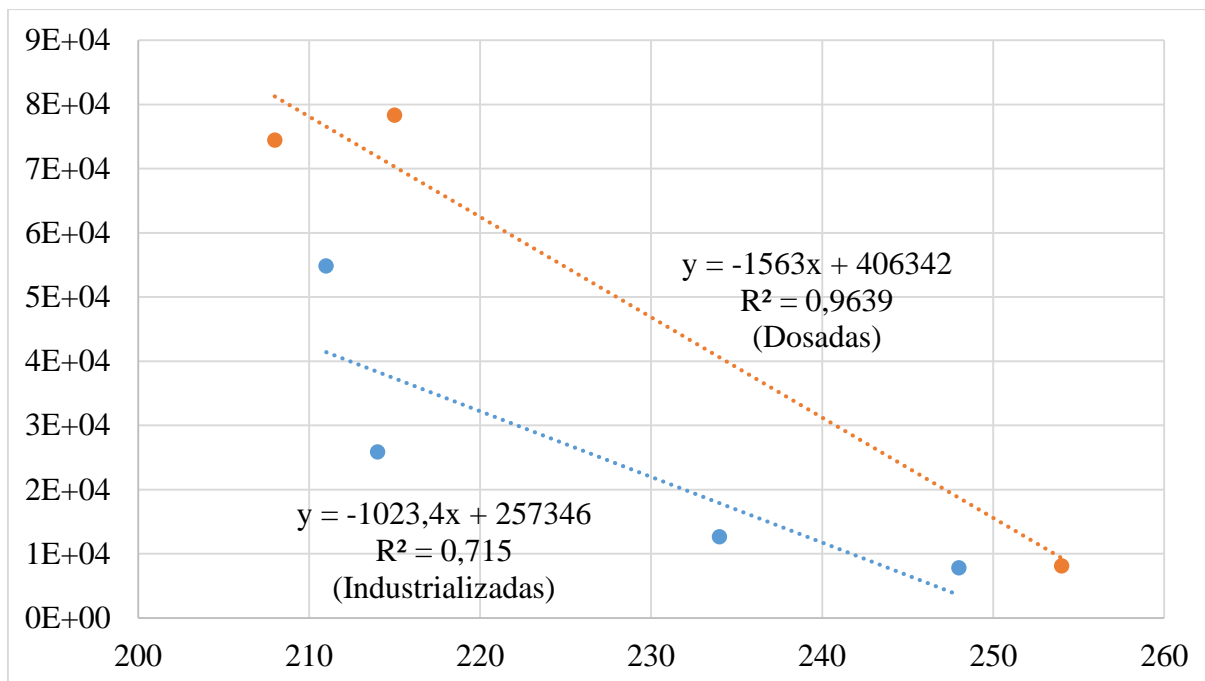
Apesar de apresentar tendência, o índice de consistência e a viscosidade apresentam fraca correlação quando analisadas simultaneamente as amostras industrializadas e dosadas, conforme apresentado na Figura 97.

Figura 97 - Correlação entre índice de consistência e viscosidade.



Ao realizar análise correlativa de amostras dosadas e industrializadas separadamente, nota-se um reforço na correlação linear, em especial para as argamassas dosadas, como mostrado na Figura 98.

Figura 98 - Correlação entre índice de consistência e viscosidade para cada tipo de amostra.



Deve-se, ao analisar estes resultados, levar em conta as limitações do ensaio de flow-table. Cardoso (2009) cita que métodos monopontos são insuficientes para efetuar avaliações completas da natureza reológica das argamassas pelo fato de que: não faz dissociação de parâmetros reológicos importantes como viscosidade e tensão de escoamento; não reproduzem a situação prática de aplicação para a qual o material foi desenvolvido. Apesar disso, é um ensaio dinâmico e prático que avalia a tendência de segregação do material e fornece uma noção rápida de consistência.

O ensaio de *flow-table* se mostrou útil na avaliação das amostras quando submetidas a situações de impacto, mostrando, no caso deste estudo, o fraco desempenho da amostra AI-3 quando solicitada dinamicamente.

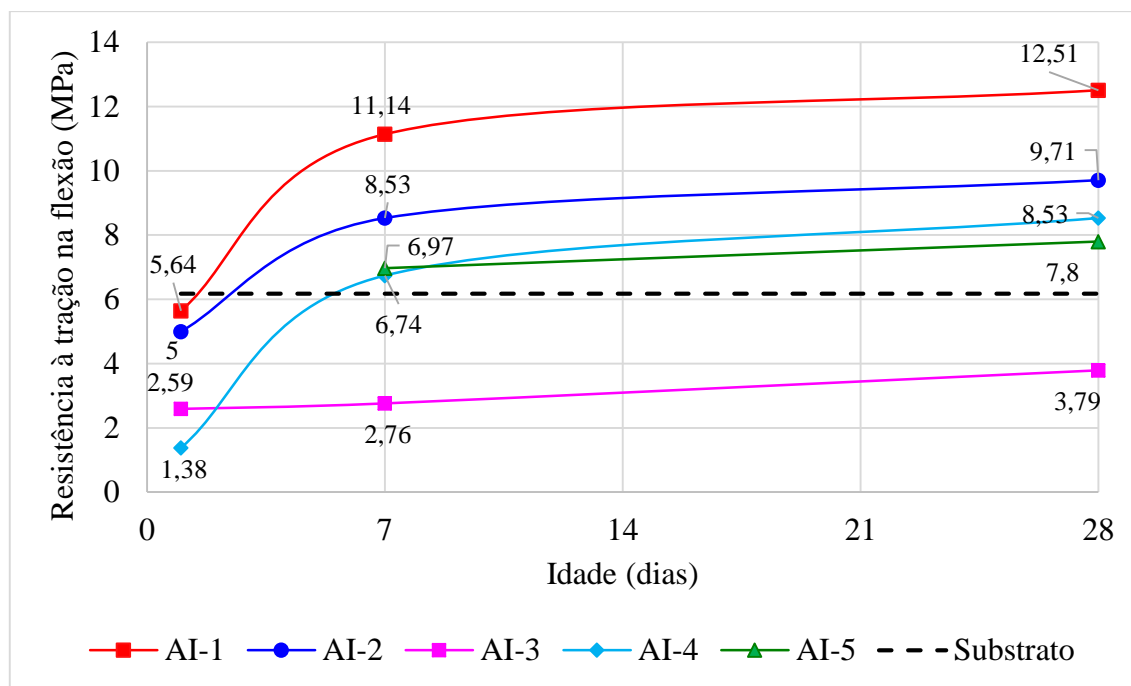
4.3.DESEMPENHO NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1. Resistência mecânica

A seguir são apresentados os resultados de resistência mecânica – tração na flexão e compressão – das argamassas. A argamassa AI-5 não atinge resistência suficiente para ensaio nas primeiras 24 horas, portanto seus resultados para esta idade não são apresentados. Pode-se

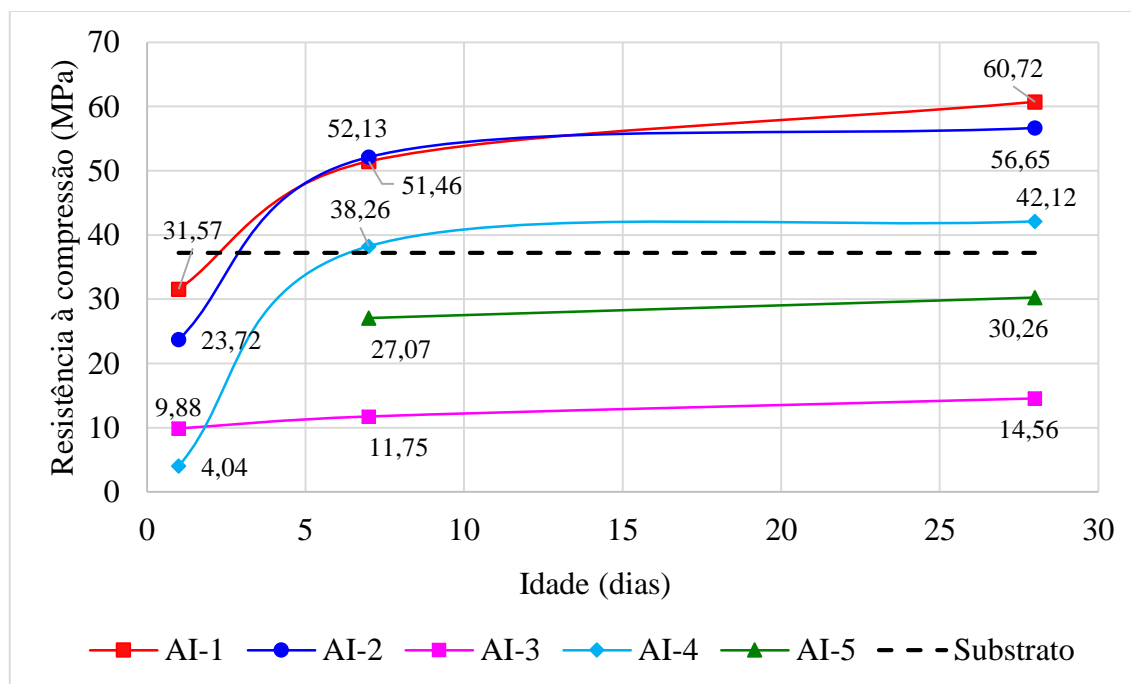
avaliar a evolução da resistência à tração na flexão na Figura 99 e a evolução da resistência à compressão das argamassas industrializadas na Figura 100.

Figura 99 - Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas industrializadas com a idade.



Fonte: O autor (2016).

Figura 100 - Evolução da resistência à compressão das argamassas industrializadas com a idade.



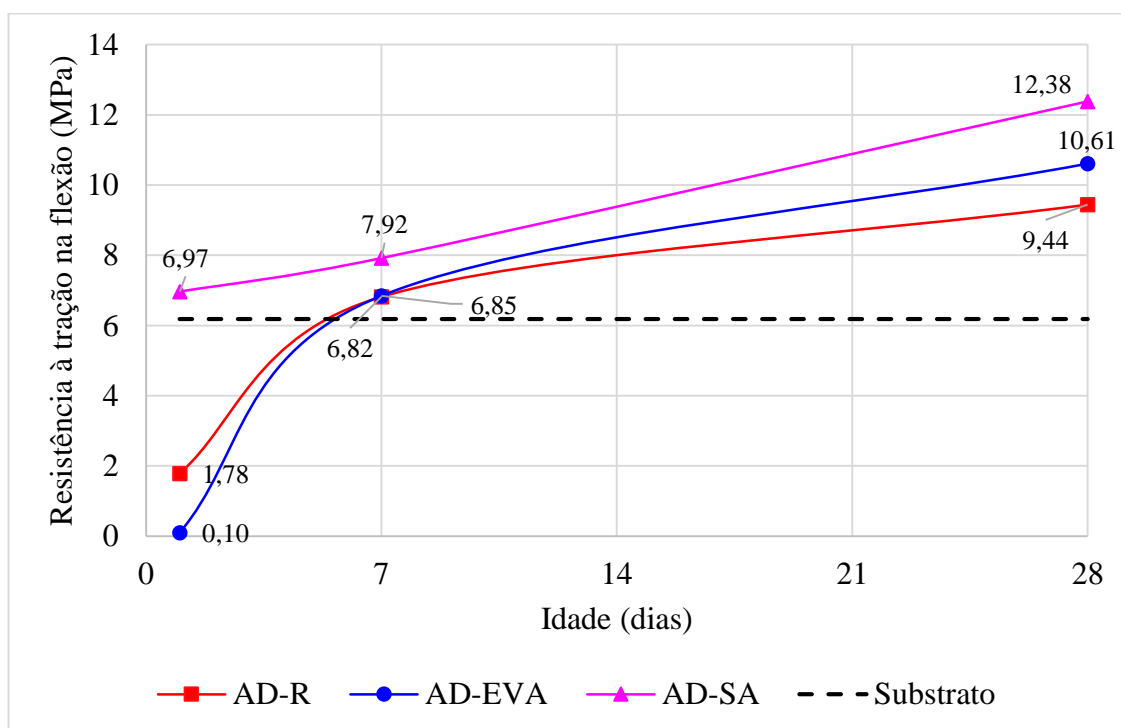
Fonte: O autor (2016).

Dos resultados obtidos quanto à caracterização de resistência mecânica das argamassas industrializadas, nota-se que as argamassas AI-1, AI-2 atingem valores de resistência mecânica superiores às outras argamassas, tendo AI-4 e AI-5 desempenhos semelhantes quanto a resistência à tração, e à compressão, AI-4 se mostrando superior.

As argamassas industrializadas AI-1 e AI-2, no que diz respeito à resistência mecânica, podem ser colocadas em serviço ao primeiro dia de hidratação, por apresentarem alta resistência inicial, possivelmente por serem dosadas com cimento desta finalidade. AI-4, que apresenta resistência mecânica acima de 38 MPa e AI-5, acima de 27 MPa aos 7 dias de hidratação, dependendo do caso de carregamento, podem ser colocadas em serviço nesta idade.

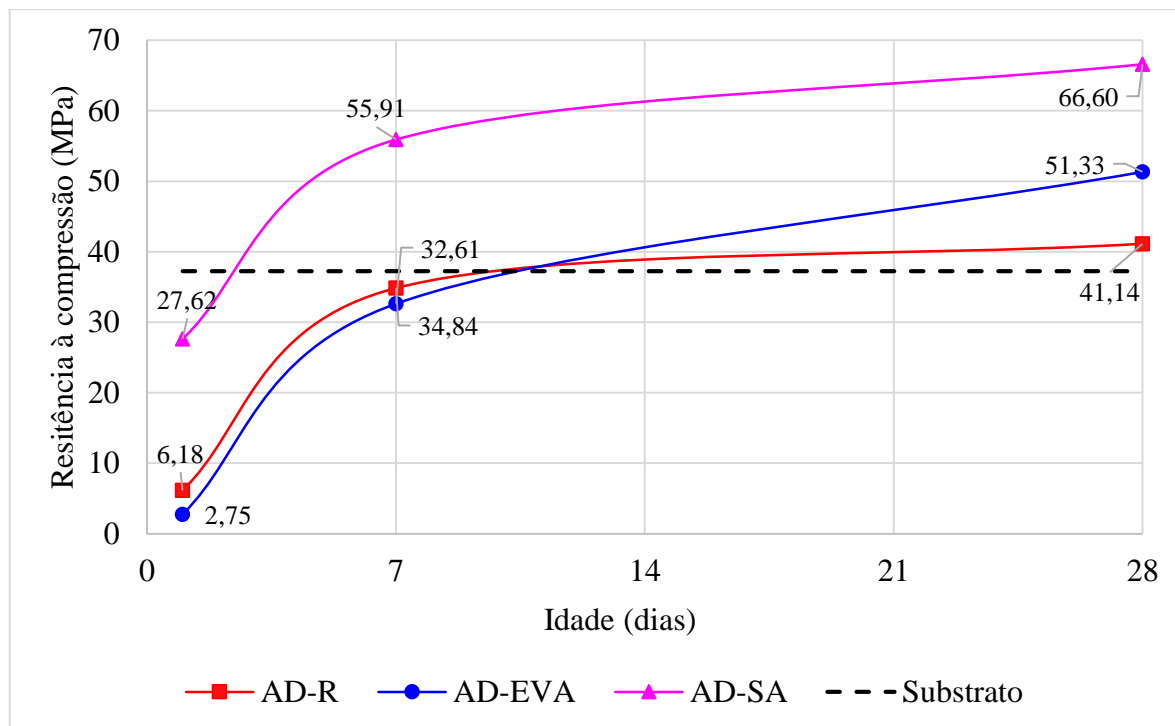
Quanto às argamassas dosadas em laboratório, pode-se avaliar a evolução da resistência à tração na flexão na Figura 101 (tração na flexão) e Figura 102 (compressão).

Figura 101 - Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas dosadas em laboratório com a idade.



Fonte: O autor (2016).

Figura 102 - Evolução da resistência à compressão das argamassas dosadas em laboratório com a idade.



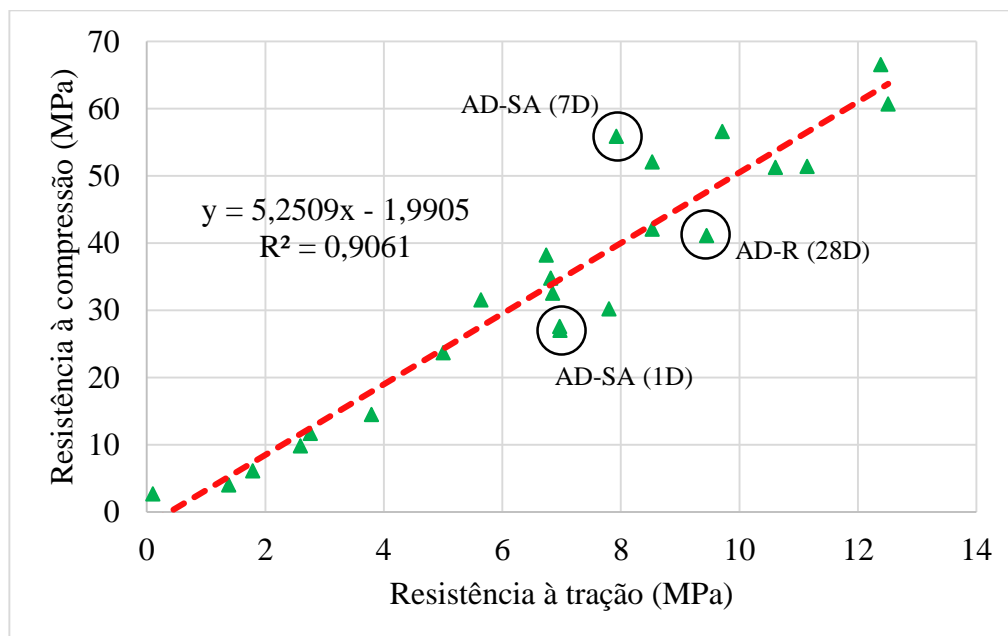
Fonte: O autor (2016).

Com relação às argamassas dosadas, nota-se claramente os efeitos das adições na resistência mecânica. A argamassa com adição de 10% de polímero EVA apresentou retardo no ganho de resistência devido ao efeito explicado por Oliveira (2004) e Messan, Ienny e Nectoux (2011). A formação do filme polimérico em volta dos grãos reduz a energia de evolução de coesão do cimento, retardando o ganho de resistência. A adição da sílica ativa em AD-SA causou ganho considerável de resistência mecânica devido à capacidade de a sílica preencher poros menores que o grão de cimento e também atuar ativamente na hidratação por ter propriedades pozolânicas nas idades mais avançadas. A argamassa de referência AD-R também obteve resultados de resistência mecânica satisfatórios para uso estrutural a partir dos 7 dias de hidratação.

Existe forte correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência a compressão, conforme mostra a Figura 103. Esta é uma propriedade importante das argamassas de reparo, levando em consideração que das 8 argamassas estudadas, 6 possuem polímeros na sua composição. Esta boa correlação mostra que as características dos polímeros atuam para ambas as solicitações de forma similar. Destacam-se as argamassas não-modificadas com polímeros

(AD-R e AD-SA), que tiveram seus resultados de resistência mecânica mais afastados da linha de tendência, evidenciando o efeito em comum dos polímeros.

Figura 103 - Relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão



Fonte: O autor (2016).

Ao estudar as argamassas industrializadas, faz-se importante relacionar os resultados de resistência mecânica à compressão obtidos nos ensaios com os descritos nos catálogos das empresas fabricantes, visto que o uso destas argamassas faz parte do dimensionamento do sistema de reparo e a resistência mecânica é fundamental para desempenho adequado deste. Como nem todas as empresas publicaram os resultados para todas as idades, fez-se a comparação para os dados disponíveis, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação de resistência mecânica das argamassas industrializadas entre o resultado ensaiado e o publicado em catálogo de produto.

Argamassa	Resistência média dos ensaios (MPa)			Resistência de catálogo (MPa)			Diferença ensaiado / catálogo (%)		
	1	7	28	1	7	28	1	7	28
AI-1	31,6	51,5	60,7	25,0	45,0	60,0	26,4%	14,4%	1,2%
AI-2	23,7	52,1	56,7	24,0	50,0	60,0	-1,3%	4,2%	-5,5%
AI-3	9,9	11,8	14,6	10,0	15,0	20,0	-1,0%	-21,3%	-27,0%
AI-4	4,1	38,3	42,1	-	-	34,0	-	-	23,8%
AI-5	-	27,1	30,3	-	40,6	47,1	-	-33,3%	-35,7%

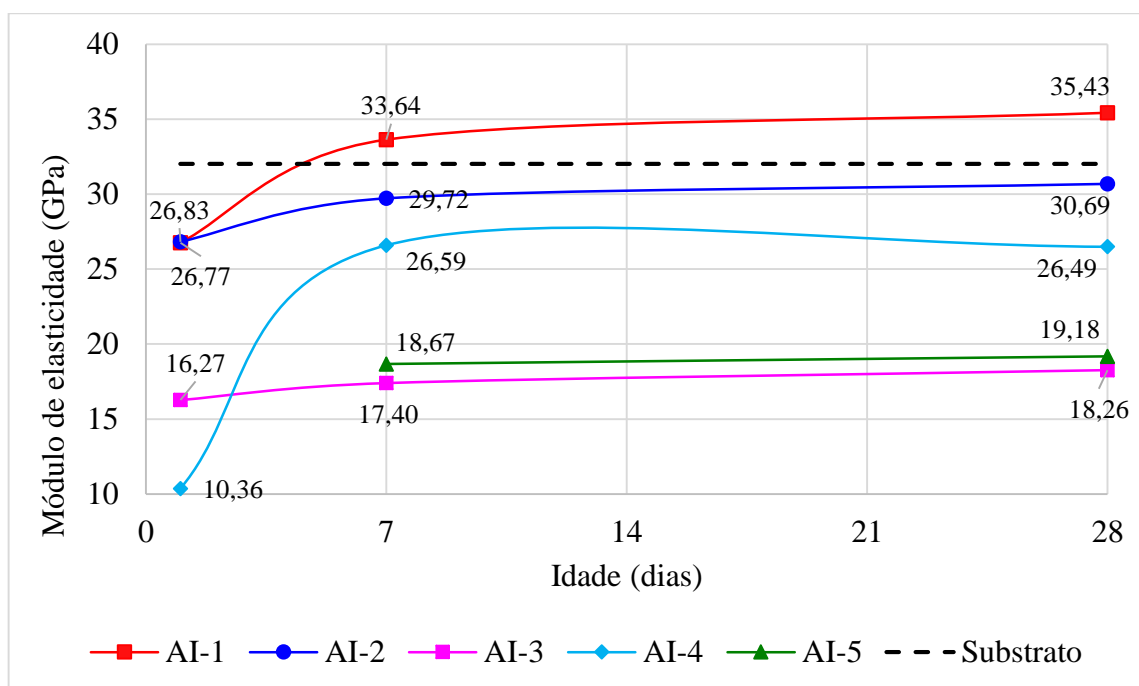
Fonte: O autor (2016); Fabricantes (2016).

Nota-se que entre as argamassas estudadas, apenas a AI-1 apresentou resultados acima dos valores catalogados para todas as idades. A argamassa AI-4, que também apresentou valor superior nos ensaios, teve divulgado no seu catálogo apenas o valor de resistência aos 28 dias, não sendo possível comparar outras idades. A argamassa AI-2 obteve resultados mais próximos do catalogado pelo fabricante, e, mesmo obtendo dois valores inferiores, as variações são pequenas.

4.3.2. Módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 104 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. A argamassa AI-5 não tem consistência suficiente para ensaio a 1 dia, portanto, assim como para os resultados de resistência mecânica, seus resultados para esta idade não são apresentados.

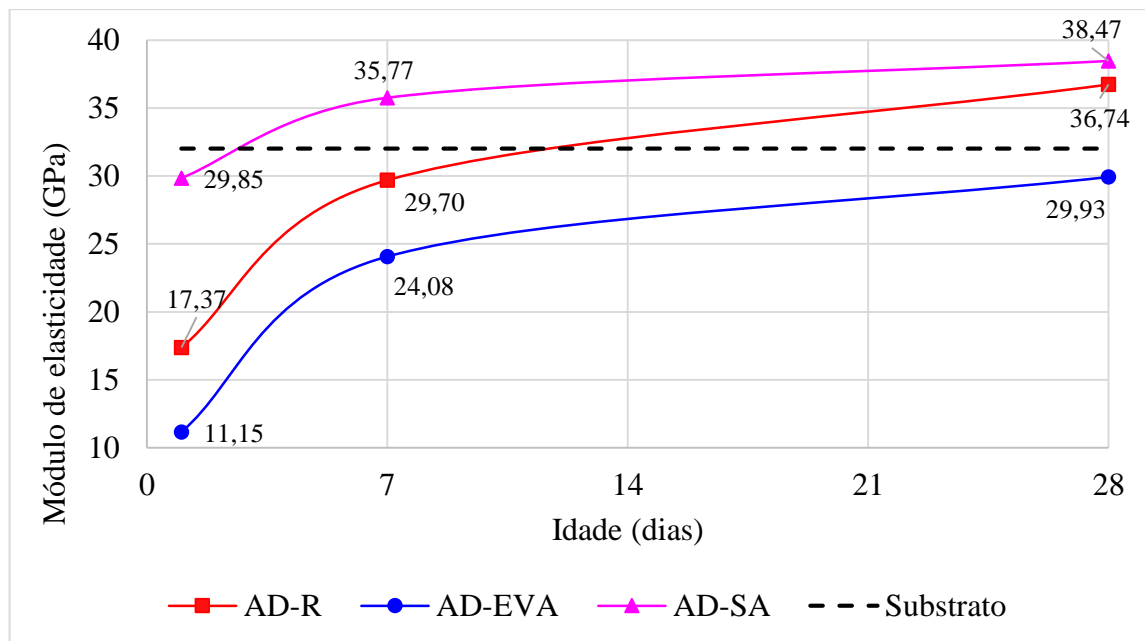
Figura 104 - Evolução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas industrializadas com a idade.



Fonte: O autor (2016).

Quanto às argamassas dosadas em laboratório, seus resultados de módulo de elasticidade estão apresentados na Figura 105.

Figura 105 - Evolução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas dosadas em laboratório com a idade.



Fonte: O autor (2016).

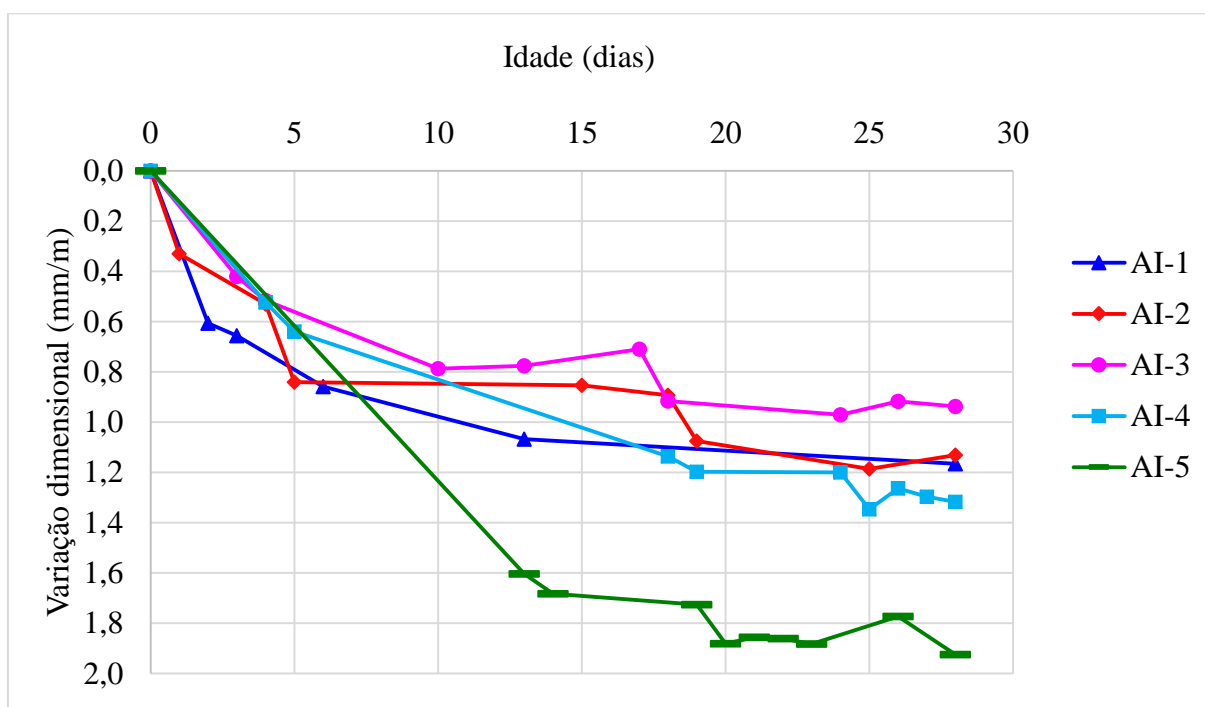
Nota-se a partir dos resultados que a presença de polímeros na mistura proporciona uma argamassa mais deformável em estado endurecido, pois os resultados de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas não-modificadas com polímeros são os maiores da série estudada aos 28 dias. Na prática, o filme polimérico coalescente formado na argamassa, por ser menos denso que o material hidratado da matriz, causa redução na velocidade da onda ultrassônica, indicando resultados menores de módulo de elasticidade dinâmico. Este efeito se aplica a argamassa em serviço, pois o filme entrelaça e mantém conexões elásticas entre os elementos hidratados e os grãos de areia, proporcionando suporte elástico na transferência de tensões (AFRIDI *et al*, 2003). Em suma, o polímero reduz a rigidez da ligação entre constituintes da argamassa.

Entre as argamassas não-poliméricas, aquela com sílica ativa (AD-SA), em consequência da ação da adição no fechamento de poros, obteve o maior módulo de elasticidade dinâmico em todas as idades.

4.3.3. Variação dimensional

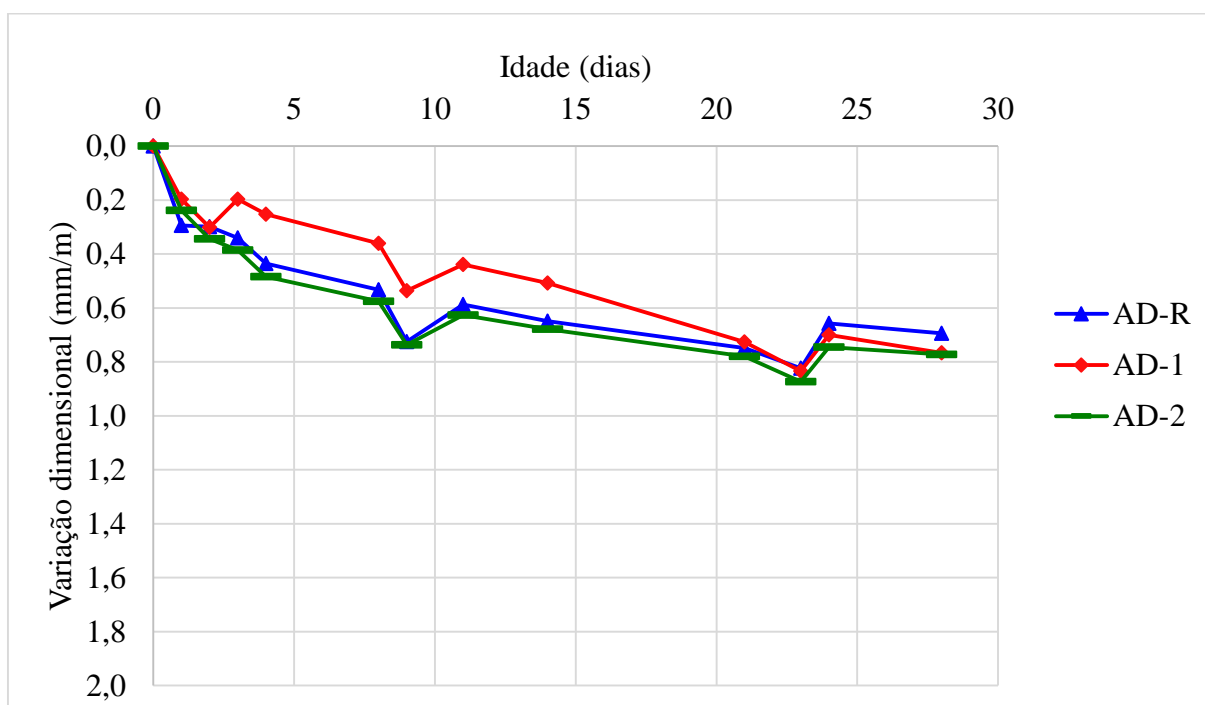
Os perfis de variação dimensional das argamassas industrializadas estão apresentados na Figura 106, enquanto que para as argamassas dosadas em laboratório estão na Figura 107.

Figura 106 - Evolução da variação dimensional das argamassas industrializadas.



Fonte: O autor (2016).

Figura 107 - Evolução da variação dimensional das argamassas dosadas em laboratório.



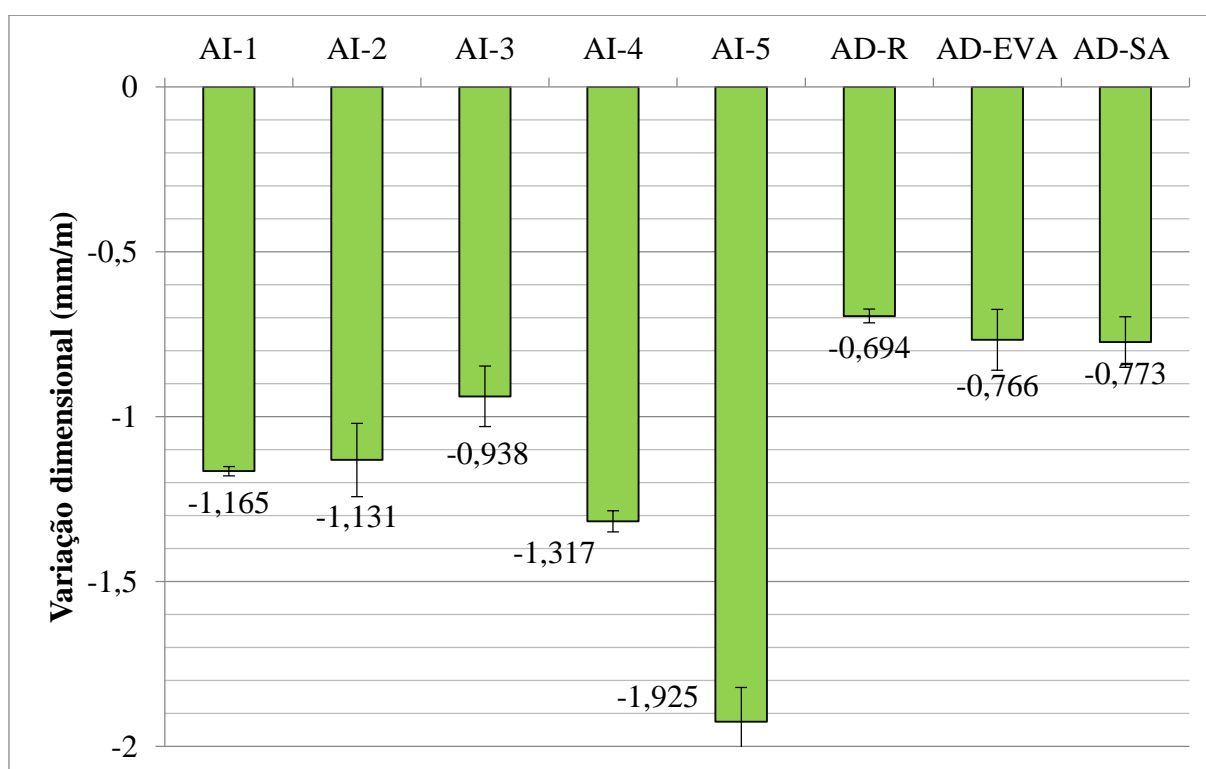
Fonte: O autor (2016).

Como se observa através dos resultados, houve retração – variação dimensional negativa – de todas as amostras. Nota-se com relação aos perfis de evolução que as argamassas

industrializadas em geral têm rápida retração às primeiras idades, como se observa que a série industrializada retraiu em 10 dias a mesma ordem que a série dosada em laboratório em 28 dias. O perfil da série industrializada apresenta certa estabilização aos 20 dias de idade, enquanto as curvas de perfil da série dosada sugerem uma continuidade na variação dimensional após os 28 dias.

Ao fim de 28 dias, pode-se observar na Figura 108 a variação dimensional ao final do ensaio.

Figura 108 - Variação dimensional final das argamassas indutrializadas aos 28 dias.



Fonte: O autor (2016).

Dentre a série industrializada, a argamassa AI-3 foi a que apresentou menor retração entre as amostras estudadas. As argamassas de melhor desempenho mecânico, AI-1 e AI-2 obtiveram resultados de variação dimensional semelhantes dentro do erro padrão. A argamassa AI-5 apresentou o maior índice de retração.

Analisando a curva granulométrica, pode-se verificar uma tendência de correlação entre o teor de finos da argamassa e a variação dimensional. Teores maiores de material fino na argamassa podem indicar maior quantidade de cimento na composição, e, conseqüentemente, maior calor de hidratação.

Deve-se destacar o desempenho da argamassa AI-2, que mesmo com alto teor de finos, retraiu por secagem relativamente pouco. Pode-se dizer que esta argamassa tem o melhor desempenho quanto à variação dimensional de toda a série industrializada.

Ao analisar a série dosada, conclui-se que as adições utilizadas nas composições não se mostraram eficientes no controle da variação dimensional por secagem, mesmo sendo elementos que reduzem a velocidade de hidratação.

4.4.RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

Os resultados obtidos para os diferentes ensaios de resistência de aderência das argamassas industrializadas apresentam as seguintes médias para 1 e 2 dias (Tabela 12), 7 dias (Tabela 13) e 28 dias (Tabela 14).

Tabela 12 - Resistências de aderência das argamassas industrializadas para os diferentes ensaios com idades de 1 dia e 2 dias (para tração direta).

Argamassa	Tração direta (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Cisalhamento direto (MPa)	Cisalhamento oblíquo (MPa)
AI-1	0,63	1,56	1,40	3,31
AI-2	0,70	3,35	1,68	4,55
AI-3	0,20	0,16	0,62	0,44
AI-4	0,54	1,21	0,98	1,83
AI-5	0,47	-	-	-

Fonte: O autor (2016).

Tabela 13 - Resistências de aderência das argamassas industrializadas para os diferentes ensaios com idade de 7 dias.

Argamassa	Tração direta (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Cisalhamento direto (MPa)	Cisalhamento oblíquo (MPa)
AI-1	0,98	4,63	1,95	4,63
AI-2	1,02	6,29	0,78	6,68
AI-3	0,49	0,21	1,69	0,72
AI-4	0,84	2,07	1,06	3,77
AI-5	0,89	0,93	1,06	2,68

Fonte: O autor (2016).

Tabela 14 - Resistências de aderência das argamassas industrializadas para os diferentes ensaios com idade de 28 dias.

Argamassa	Tração direta (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Cisalhamento direto (MPa)	Cisalhamento oblíquo (MPa)
AI-1	1,38	4,94	2,01	6,10
AI-2	1,49	6,76	2,16	7,38
AI-3	0,74	1,41	0,92	1,42
AI-4	1,25	3,34	1,71	5,38
AI-5	1,23	2,94	1,26	3,85

Fonte: O autor (2016).

Analisando os resultados obtidos, nota-se, pelas médias das argamassas industrializadas, que a argamassa AI-2 apresentou a melhor resistência média de aderência, seguida por AI-1, AI-4, AI-5 e AI-3. Este é um panorama observado para toda a interação entre tipo de argamassa e tipo de ensaio, sendo a exceção para o cisalhamento oblíquo, onde a argamassa AI-4 foi melhor que AI-1 para 7 e 28 dias.

Com relação ao tipo de ensaio, nota-se que as argamassas industrializadas têm um melhor comportamento ao cisalhamento oblíquo, seguido por tração na flexão, cisalhamento direto e tração direta. É coerente que este perfil seja traçado desta forma, pois tração na flexão e cisalhamento oblíquo sofrem influência de compressão, o que é favorável para a aderência. Este perfil de comportamentos é útil para avaliação de desempenho do reparo sob solicitações reais, exemplificadas na Figura 17. Um reparo que envolva esforço de tração direta sobre a zona de transição do sistema, por exemplo, deve ter um tratamento mais cuidadoso.

Ao analisar as argamassas dosadas em laboratório, têm-se as seguintes médias para 1 e 2 dias (Tabela 15), 7 dias (Fonte: O autor (2016).

Tabela 16) e 28 dias (Tabela 17).

Tabela 15 - Resistências de aderência das argamassas dosadas para os diferentes ensaios com idades de 1 dia e 2 dias (para tração direta).

Argamassa	Tração direta (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Cisalhamento direto (MPa)	Cisalhamento oblíquo (MPa)
AD-R	0,55	1,34	0,76	1,06
AD-EVA	0,34	0,61	0,56	0,7
AD-SA	0,69	1,46	0,98	1,75

Fonte: O autor (2016).

Tabela 16 - Resistências de aderência das argamassas dosadas para os diferentes ensaios com idade de 7 dias.

Argamassa	Tração direta (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Cisalhamento direto (MPa)	Cisalhamento oblíquo (MPa)
AD-R	0,62	2,90	1,06	1,87
AD-EVA	0,51	2,24	0,88	1,42
AD-SA	0,76	3,51	1,42	3,04

Fonte: O autor (2016).

Tabela 17 - Resistências de aderência das argamassas dosadas para os diferentes ensaios com idade de 28 dias.

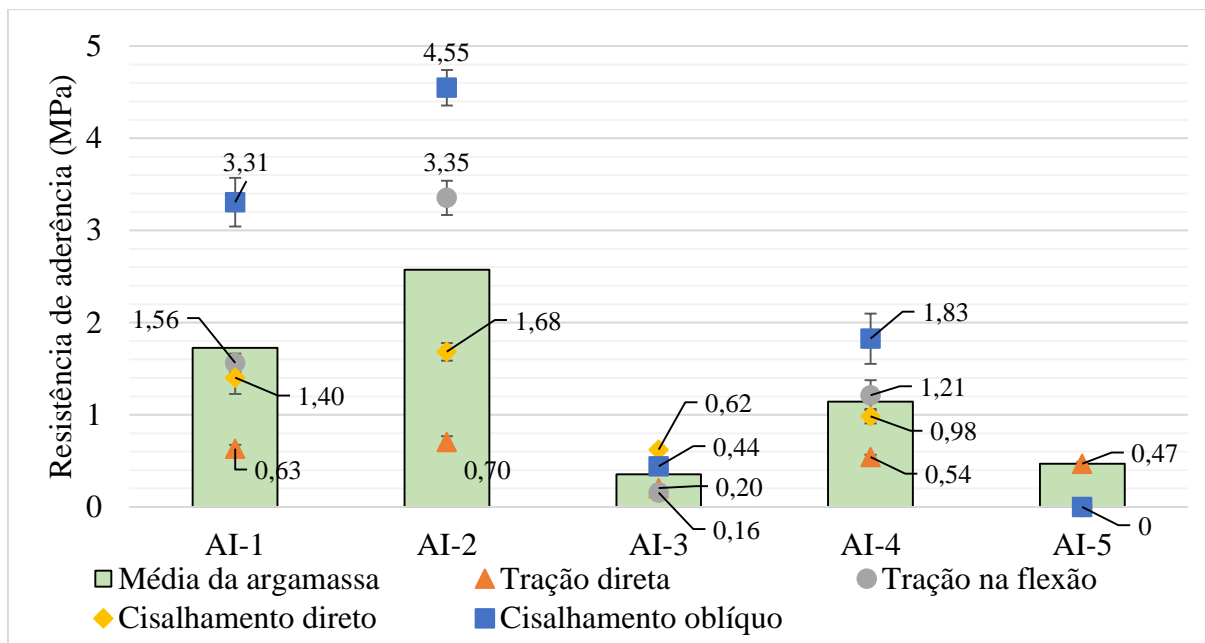
Argamassa	Tração direta (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Cisalhamento direto (MPa)	Cisalhamento oblíquo (MPa)
AD-R	0,73	3,19	1,31	2,14
AD-EVA	0,99	3,73	2,06	3,16
AD-SA	1,13	3,58	2,11	3,91

Fonte: O autor (2016).

Em geral, as médias de resistência de aderência das argamassas industrializadas foram superiores às dosadas em laboratório, mesmo com as argamassas AI-3 e AI-5 apresentando desempenho abaixo das médias. Por outro lado, as médias das argamassas dosadas em laboratório também foram impactadas pela baixa velocidade de hidratação de AD-EVA causada pelo efeito do filme polimérico nos grãos de cimento e pela ausência de acelerador de pega. Fica também notável o importante ganho de aderência proporcionado pelo polímero em comparação à argamassa de referência.

A influência entre os fatores estudados – tipo de argamassa, idade e tipo de ensaio – pode ser avaliada através de análise de variância (ANOVA), testando o experimento de dois fatores para cada idade, com confiabilidade de 95%. Conforme se observa nos testes apresentados no apêndice C, há significância de resultados entre os diferentes tipos de argamassas, bem como há significância entre os tipos de ensaios, mostrando desta forma que as argamassas de reparo têm comportamentos distintos para diferentes tipos de solicitação para todas as idades ensaiadas. Graficamente, observa-se o comportamento de aderência de cada argamassa conforme Figura 109, Figura 110 e Figura 111.

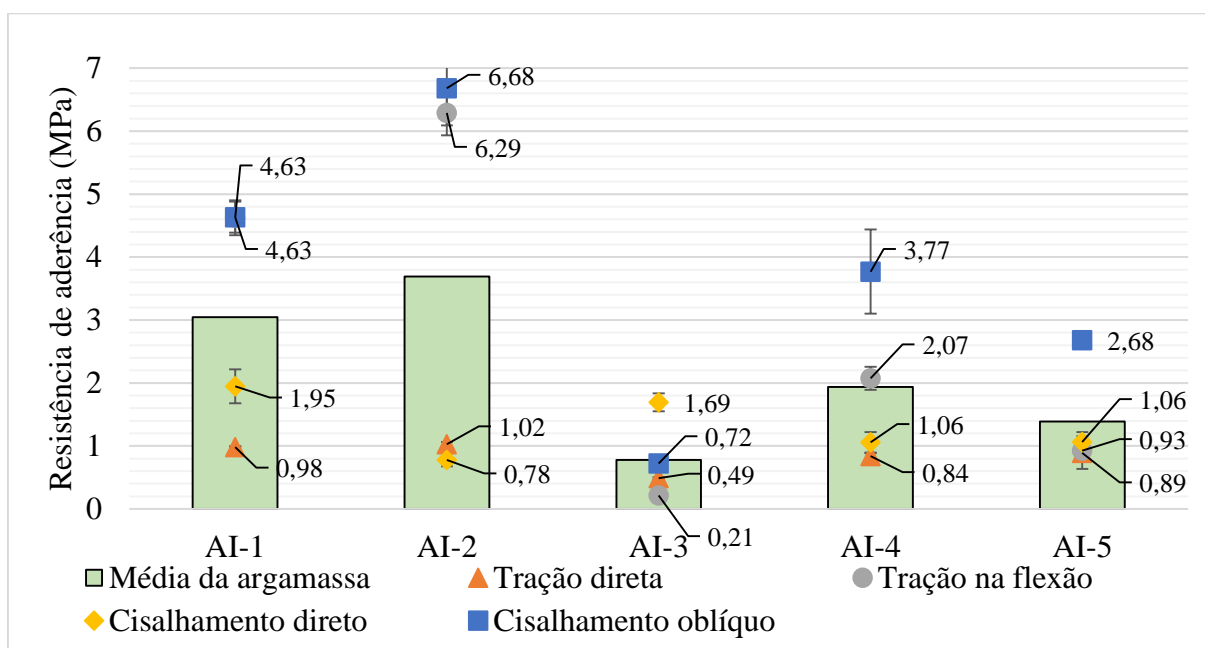
Figura 109 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas industrializadas com idade de 1 e 2 dias.



Fonte: O autor (2016).

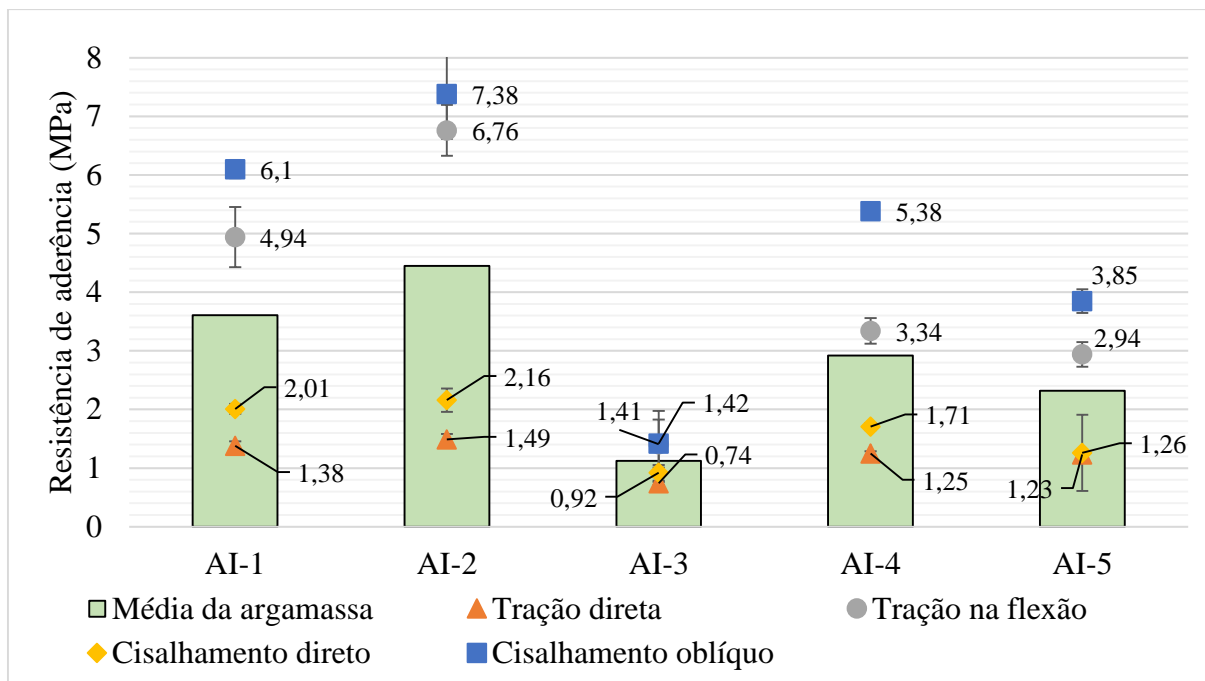
O que se observa na Figura 109 são as resistências de aderência de AI-1 e AI-2, as únicas que atingem a média da idade (elevada pelo efeito das resistências à tração na flexão e cisalhamento oblíquo de AI-2) influenciadas pelo cimento de alta resistência inicial.

Figura 110 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas industrializadas com idade de 7 dias.



Fonte: O autor (2016).

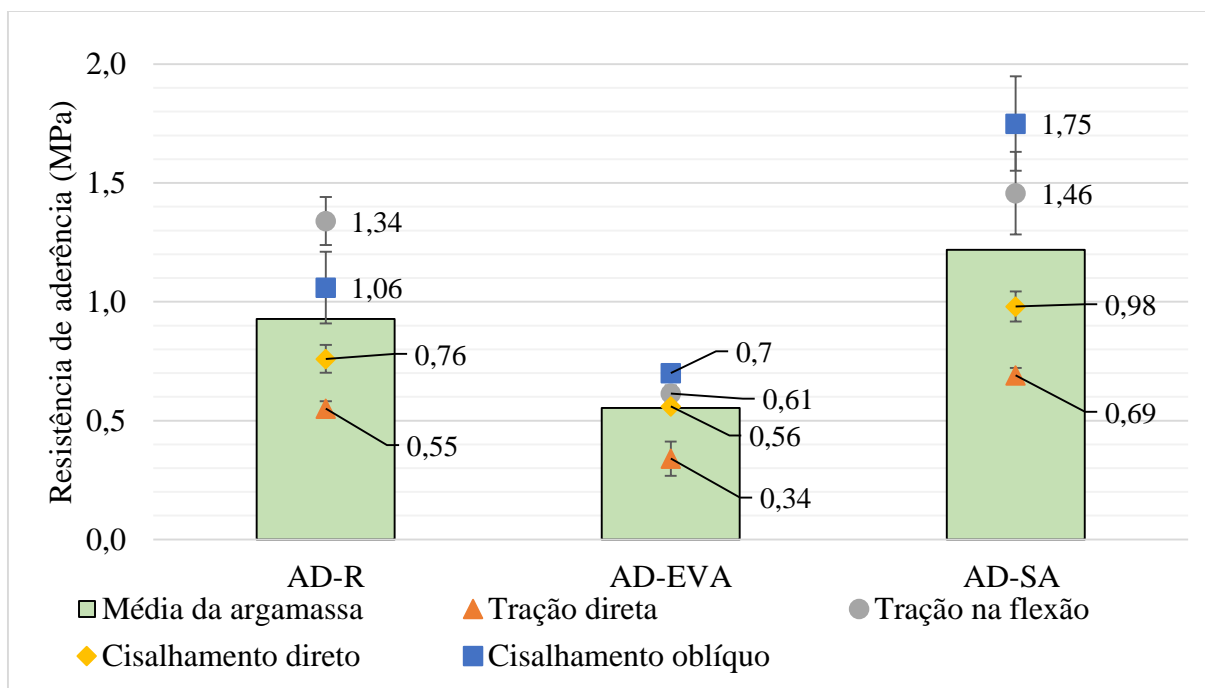
Figura 111 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas industrializadas com idade de 28 dias.



Fonte: O autor (2016).

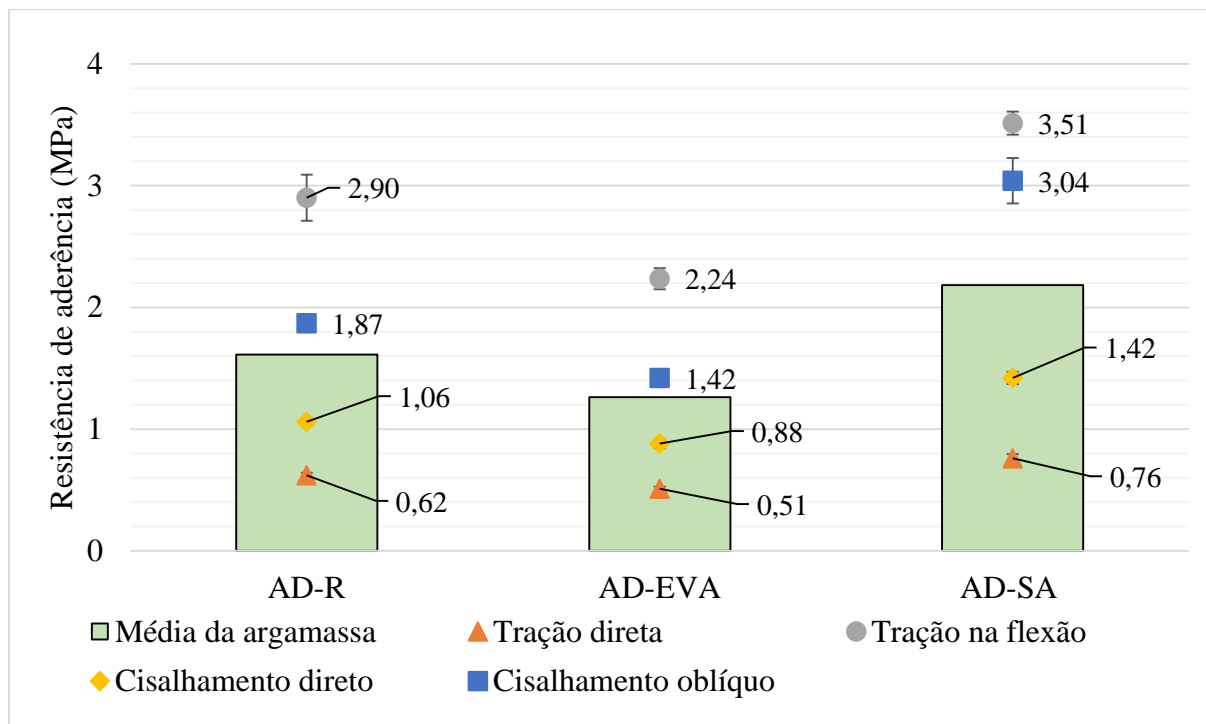
As análises gráficas dos resultados de resistência de aderência das argamassas dosadas em laboratório estão apresentadas na Figura 112, Figura 113 e Figura 114.

Figura 112 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas dosadas com idade de 1 e 2 dias.



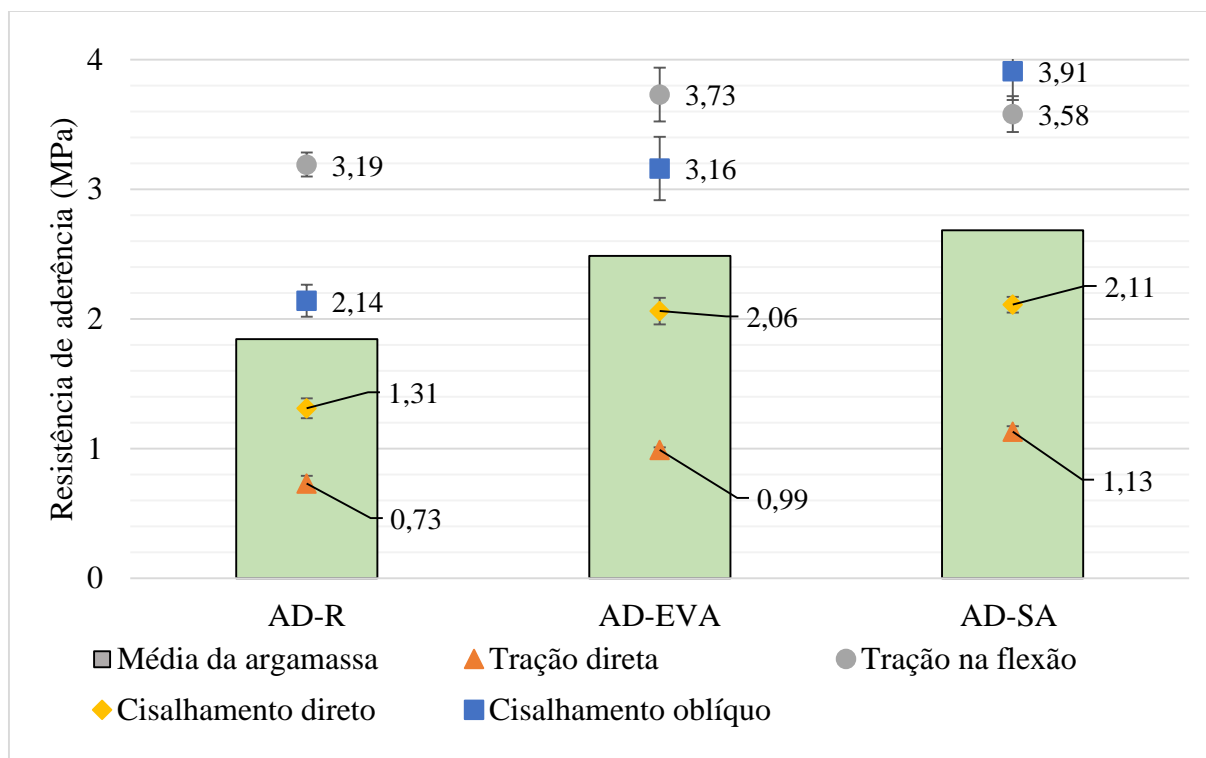
Fonte: O autor (2016).

Figura 113 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas dosadas com idade de 7 dias.



Fonte: O autor (2016).

Figura 114 - Comparação de médias de resistência de aderência das argamassas dosadas com idade de 28 dias.



Fonte: O autor (2016).

Das argamassas dosadas em laboratório, pode-se dizer que a adição de 10% de sílica ativa na mistura melhora significativamente a resistência de aderência em todos os tipos de ensaio com relação à argamassa de referência. A adição de 10% de polímero EVA atrasa o ganho de resistência nas primeiras idades, conforme já observado e relacionado neste trabalho, porém o ganho de resistência com o tempo mostra que o polímero faz com que esta argamassa supere a resistência de aderência da referência antes dos 28 dias.

4.4.1. Considerações sobre os resultados de resistência de aderência

Após realizados os ensaios de resistência de aderência à tração direta, todos os corpos de prova apresentaram ruptura na interface de transição entre matriz e substrato (ruptura tipo B da NBR 13528:2010), mostrando que este é o elo mais frágil do sistema para este tipo de esforço.

Os ensaios de aderência à tração na flexão apresentaram todas as rupturas ocorrendo na zona de interface entre matriz e substrato, mostrando que para este tipo de esforço solicitante, esta zona é o elo mais frágil do sistema. Com a evolução da idade, houve, com exceção das amostras da argamassa AI-3, maior incidência de material de substrato preso à matriz (Figura 115). Para as amostras de AI-3, devido à baixa resistência, para todas as idades a interface se mostrou limpa (Figura 116).

Figura 115 - Ruptura de corpo de prova da argamassa AI-2 à tração na flexão aos 28 dias.



Fonte: O autor (2016).

Figura 116 - Ruptura de corpo de prova da argamassa AI-3 à tração na flexão aos 28 dias.



Fonte: O autor (2016).

O ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto apresentou dois tipos distintos de local de ruptura: ruptura no substrato (Figura 117) e ruptura na zona de interface (Figura 118). Ao primeiro dia de idade, houve incidência de 100% das rupturas na interface, enquanto que para a idade de 28 dias, com exceção das amostras da argamassa AI-3, que sofreram ruptura na interface, houve incidência de 100% de ruptura no substrato. Para a idade intermediária de 7 dias, o perfil de rupturas está apresentado na Tabela 18.

Figura 117 - Ruptura de corpos de prova ao cisalhamento direto no substrato

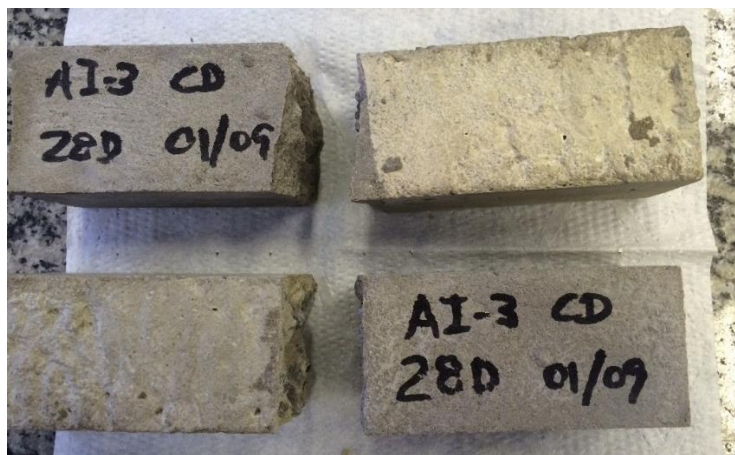


Fonte: O autor (2016).

Esta situação de ruptura da Figura 117 é satisfatória, pois configura uma condição onde a resistência de aderência do sistema quando solicitado por cisalhamento direto é superior à resistência ao cisalhamento do próprio substrato. Isto já foi discutido por Medeiros, Helene e

Selmo (2009) e mostra a eficiência da ligação formada pelas argamassas de reparo no substrato de concreto a esse tipo de esforço.

Figura 118 - Ruptura de corpos de prova ao cisalhamento direto na zona de transição



Fonte: O autor (2016).

Tabela 18 – Perfil de rupturas de corpos de prova ao cisalhamento direto aos 7 dias de idade.

Argamassa	Ruptura no substrato (%)	Ruptura na interface (%)
AI-1	100	0
AI-2	100	0
AI-3	0	100
AI-4	66,6	33,3
AI-5	33,3	66,6
AD-R	33,3	66,6
AD-EVA	0	100
AD-SA	100	0

Fonte: O autor (2016).

O ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo mostrou as maiores tensões das argamassas em geral. Isso se explica pelo fato de que o sistema de reparo quando solicitado por este tipo de esforço, conta com uma resultante que comprime a zona de transição, dificultando mecanicamente o processo de escorregamento da matriz no plano de cisalhamento.

Nota-se com relação às argamassas dosadas a diminuição na influência do EVA na resistência ao cisalhamento oblíquo, na comparação da argamassa AD-EVA com AD-SA. Isso pode ser explicado pela eficiência da sílica ativa na resistência à compressão dos materiais cimentícios, visto que a aderência ao cisalhamento oblíquo é ativada através de um esforço de compressão axial.

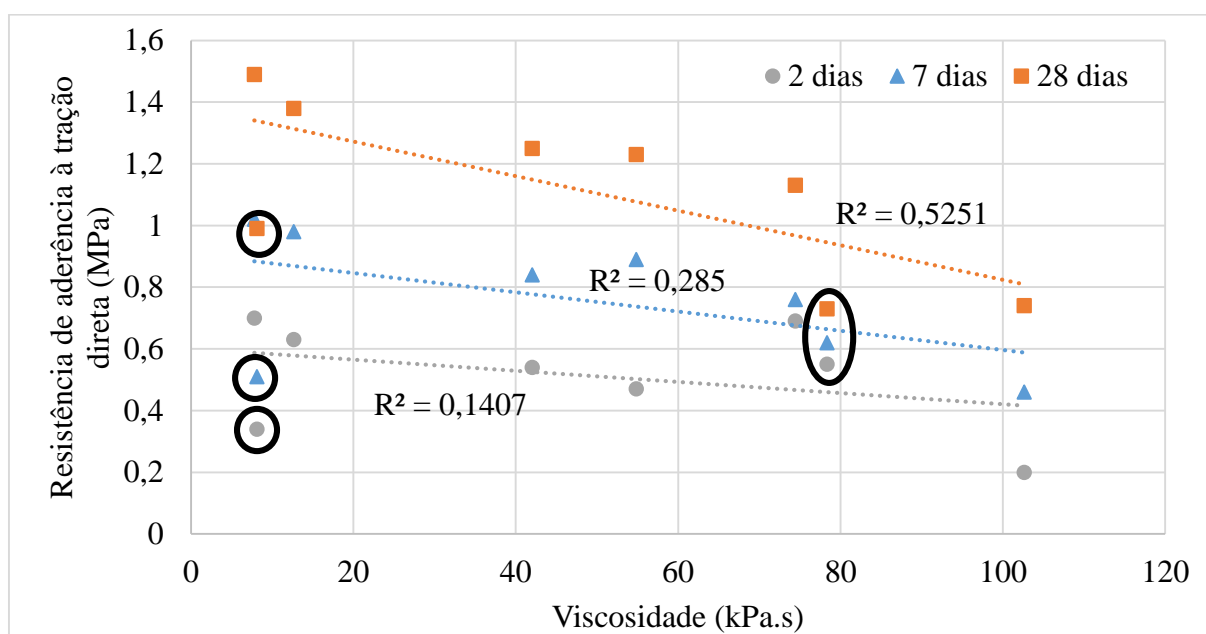
4.4.2. Influência do comportamento reológico sobre a resistência de aderência

Este capítulo apresenta a análise dos resultados que compreendem o objetivo principal do estudo. Feitas as análises detalhadas do comportamento reológico no estado fresco das argamassas, através do estudo de deformabilidade, viscosidade, consistência, tensões de escoamento e cisalhamento e a determinação das tensões principais e seus respectivos planos de atuação, bem como o estudo detalhado do comportamento quanto às resistências de aderência sob diferentes tipos de solicitação – tração direta, à flexão, por cisalhamento direto e oblíquo, pode-se então correlacionar estas informações e concluir a respeito do comportamento de interação entre si.

Como as moldagens dos corpos de prova foram realizadas imediatamente após as misturas, a análise será feita apenas para as grandezas reológicas obtidas a tempo zero. De acordo com as variações do comportamento das grandezas obtidas a tempo de vinte minutos – aumento significativo na viscosidade e perda de trabalhabilidade, pode-se chegar a conclusões indiretas do efeito sobre a aderência da matriz ao aplicá-la com tempos de repouso.

A Figura 119 correlaciona os resultados de viscosidade obtidos através do estudo do comportamento reológico com as resistências de aderência à tração direta.

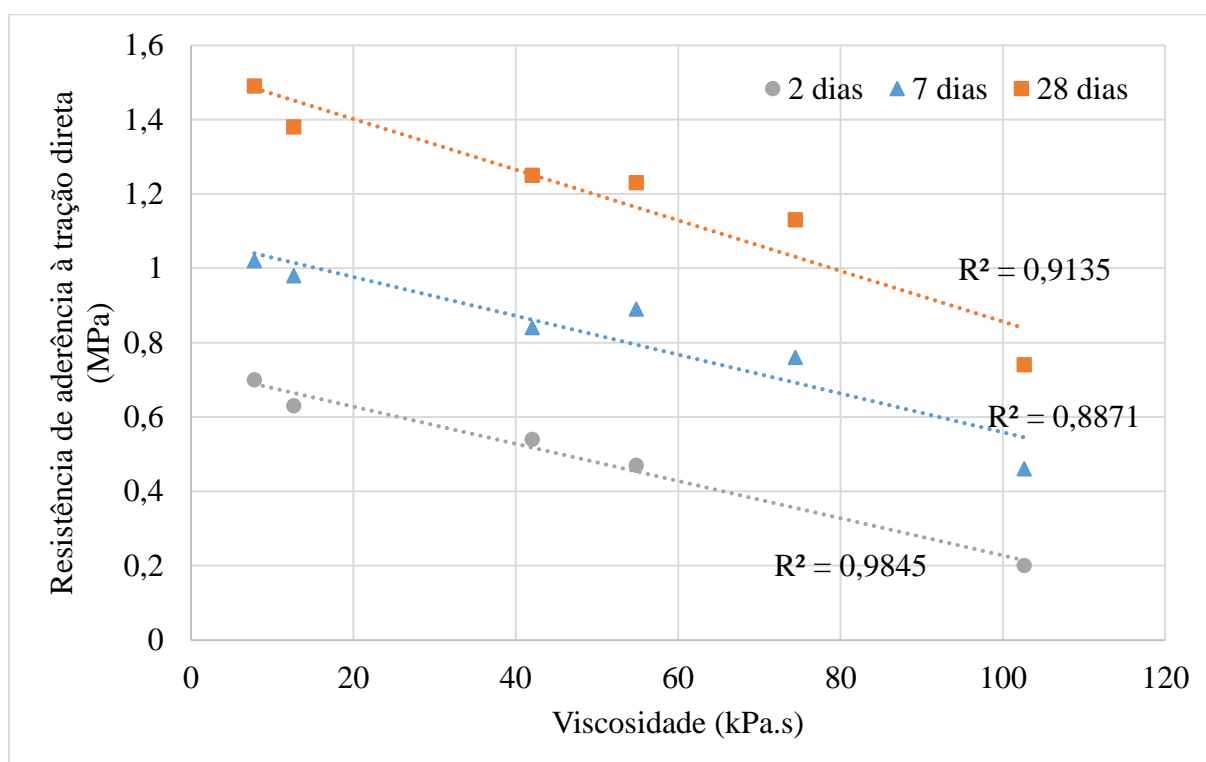
Figura 119 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência à tração direta das argamassas estudadas



Fonte: O autor (2016).

Uma primeira análise da influência da viscosidade sobre a aderência à tração direta sugere uma fraca correlação. Porém, nota-se que há dois dados que se apresentam consideravelmente fora da linha de tendência: AD-R e AD-EVA – destacados na Figura 119. As tendências de comportamento para as diferentes idades é de argamassas de viscosidades menores apresentam maior aderência à tração direta. A argamassa AD-EVA tem viscosidade baixa devido ao efeito de rolamento entre partículas proporcionado pelo EVA, porém o efeito colateral desta adição sobre o ganho de resistência resulta na inversão deste padrão para esta amostra. A argamassa de referência (AD-R) possui alta viscosidade, porém o resultado da resistência de aderência ficou bastante abaixo da curva de tendência, evidenciando os efeitos benéficos de adições para este tipo de argamassa. Ao retirar do gráfico estas duas argamassas, a correlação fica conforme Figura 120.

Figura 120 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência à tração direta das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.



Fonte: O autor (2016).

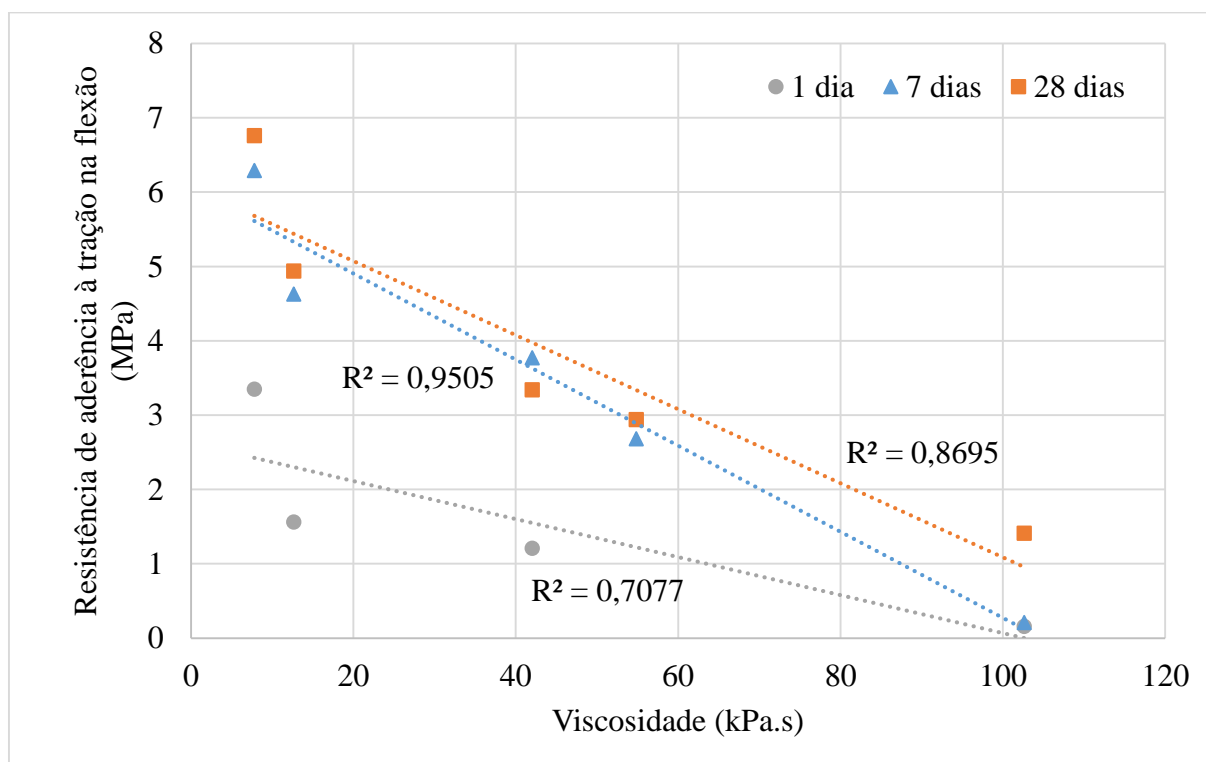
Este é um padrão que se repete para todos os outros tipos de ensaio, com AD-R e AD-EVA apresentando comportamentos discrepantes das outras argamassas. De acordo com os resultados, argamassas menos viscosas tendem a gerar maiores resistências de aderência. Isso confirma a premissa da importância da superfície de molhamento citado por Costa (2014). A capacidade de um fluido se espalhar com mais eficiência sobre uma superfície é maior para

fluidos menos viscosos, e esta capacidade maior de espalhamento gera uma maior superfície de contato na zona de transição do sistema de reparo.

Com relação à argamassa AD-EVA, que não correspondeu às tendências de correlação entre aderência e viscosidade por ter seu ganho de resistência retardado pelo efeito do polímero EVA na composição, observando os seus ganhos de resistência aos 28 dias e a tendência de maior crescimento neste quesito, pode-se afirmar que para idades ainda maiores, esta argamassa pode vir a ganhar resistências equivalentes às argamassas industrializadas de viscosidade semelhante.

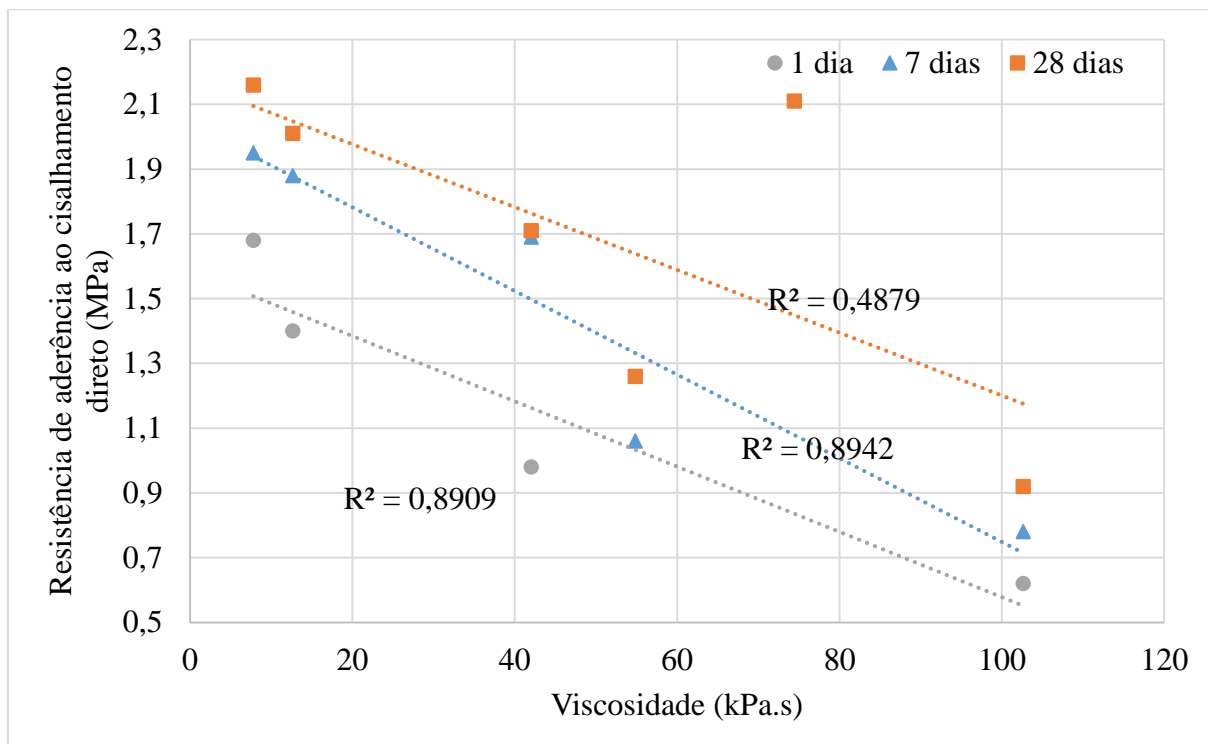
As correlações entre a viscosidade e os outros ensaios de resistência de aderência estão apresentados na Figura 121, Figura 122 e Figura 123.

Figura 121 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência à tração na flexão das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.



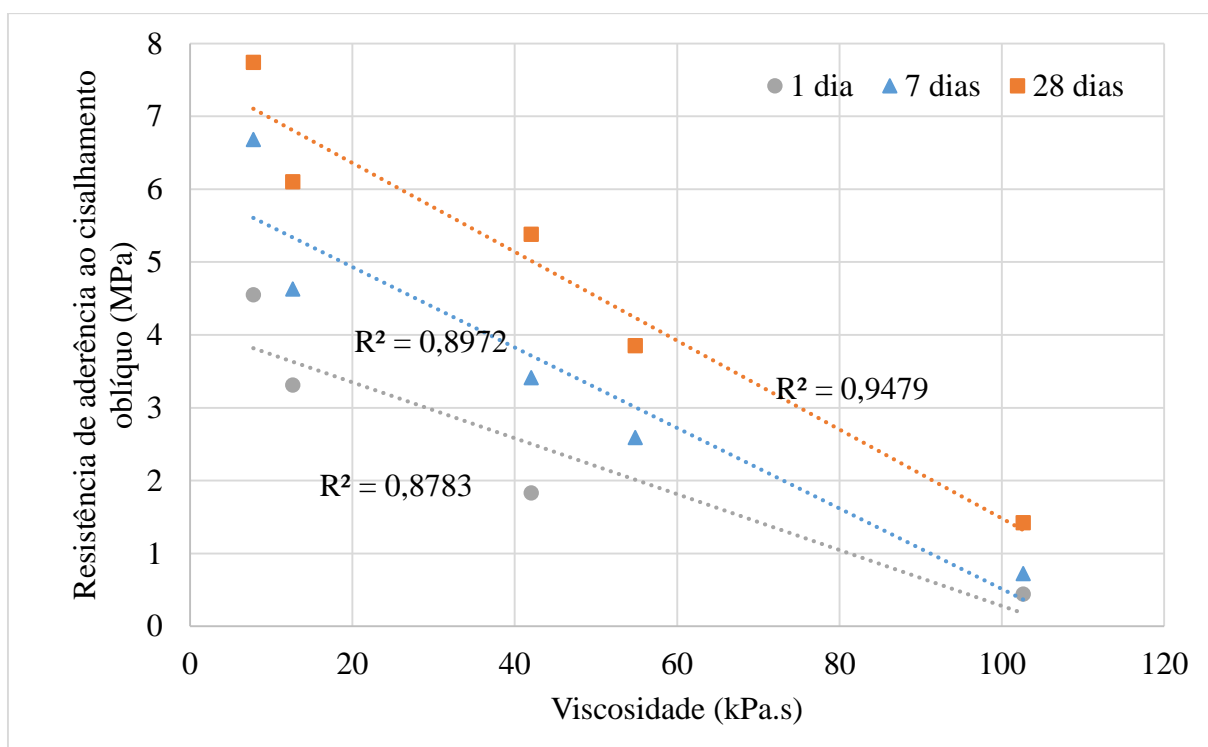
Fonte: O autor (2016).

Figura 122 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência ao cisalhamento direto das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.



Fonte: O autor (2016).

Figura 123 - Correlação entre a viscosidade e a resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo das argamassas estudadas com exceção de AD-R e AD-EVA.



Fonte: O autor (2016).

Nota-se na Figura 123 a correlação entre viscosidade e resistência de aderência ao cisalhamento direto aos 28 dias ser baixa, mesmo excluindo as argamassas AD-R e AD-EVA. Este fato explica-se devido ao perfil de rupturas nesta idade para este ensaio ser, com exceção de AI-3, totalmente no substrato. Este fator elimina a influência da viscosidade da matriz na resistência de aderência, já que a aderência substrato-matriz não chegou a ser testada pela limitação da resistência do substrato.

4.5.MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

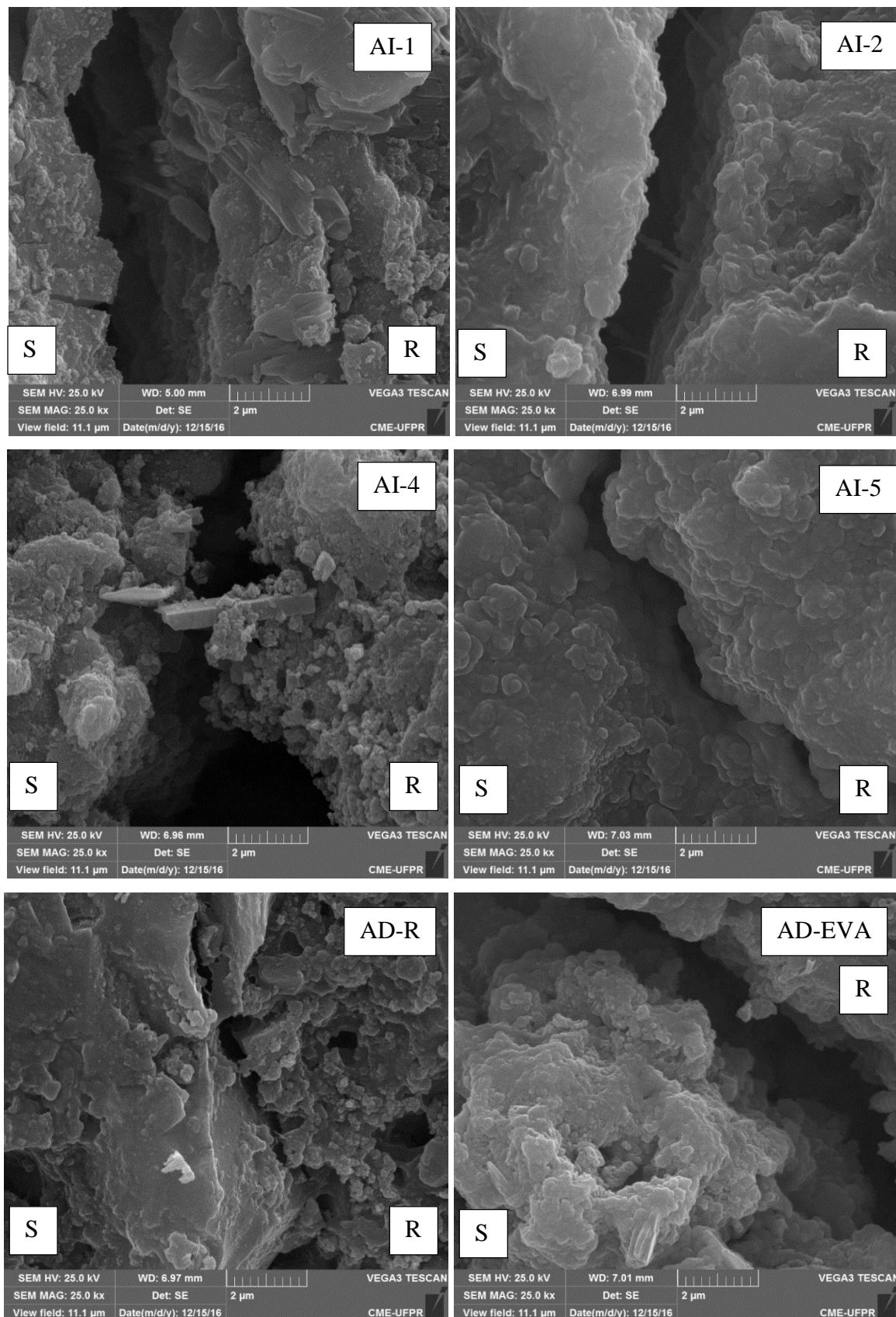
As imagens de microscopia eletrônica de varredura estão apresentadas neste item.

A Figura 124 apresenta as imagens de MEV analisando a interface de ligação do sistema de reparo com aumento de 25 mil vezes. Nota-se que a interface mede por volta de 2 μm para todos os sistemas analisados, porém, pode-se observar que, entre as industrializadas, AI-1 e AI-2 possuem as interfaces mais bem construídas, ao contrário de AI-4 e AI-5, com interface bastante irregular. A argamassa AD-R apresentou uma interface irregular e com alto índice de porosidade, ao contrário de AD-EVA, que apresentou interface com a regularidade a nível de AI-1 e AI-2. Estas, que foram as argamassas com melhor desempenho reológico ao ensaio de *squeeze-flow* e que apresentaram melhores resultados de resistência de aderência para todos os tipos de solicitação, comprovando assim o efeito das propriedades reológicas sobre a extensão e resistência de aderência.

Ao analisar as imagens aumentadas em 1000 vezes (Figura 125), é possível visualizar a zona de interface do sistema para AI-1, AI-2 e AD-EVA como as mais bem definidas e regulares, enquanto AI-4 e AI-5 apresentaram esta zona com incidência de microfissurações. A argamassa AD-R apresenta uma interface porosa, podendo ser explicado pelo seu comportamento reológico.

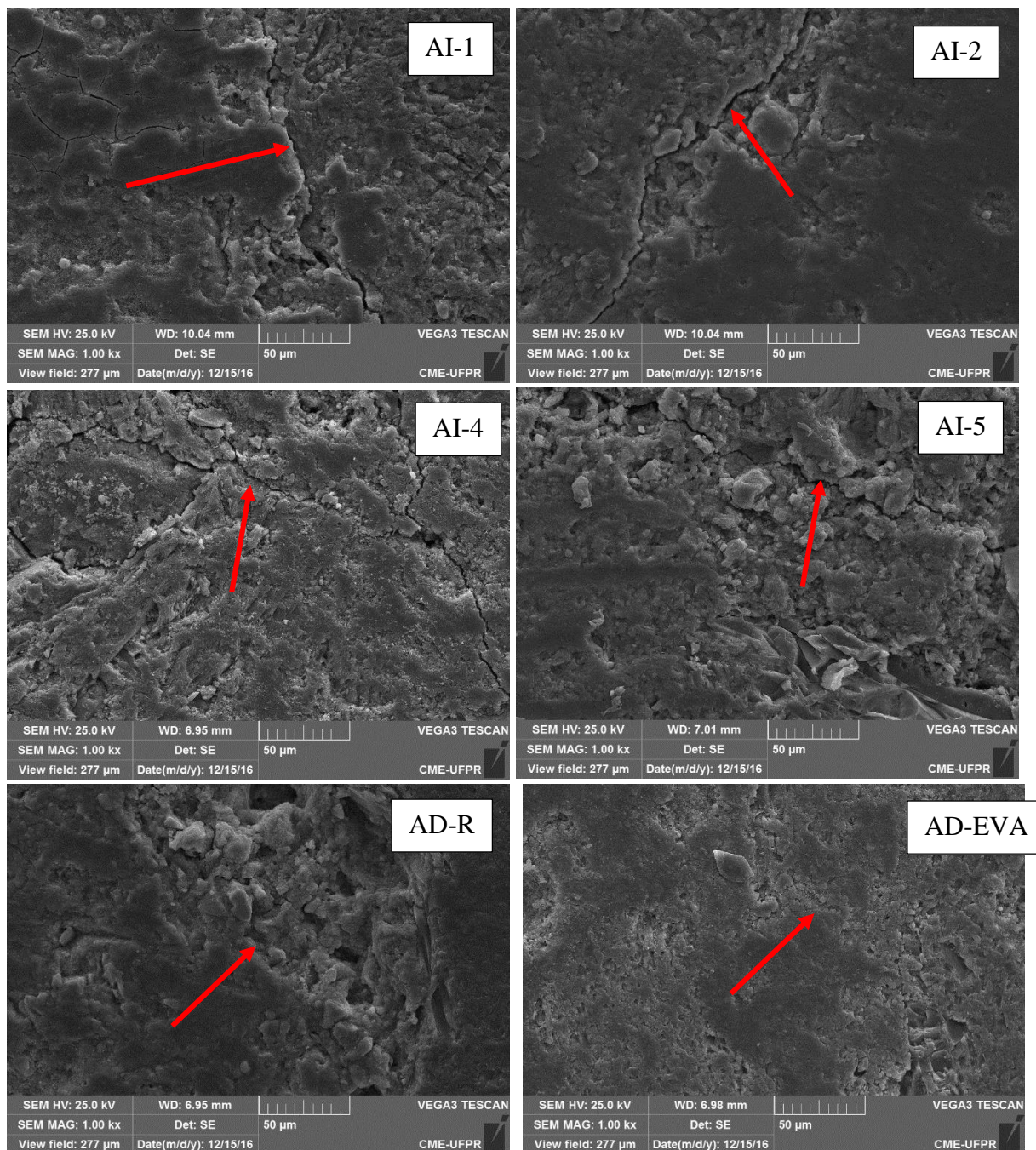
A análise das interfaces com ampliação em 1.000 e em 25 mil vezes corrobora a hipótese da eficácia do espalhamento conforme as características reológicas forem mais favoráveis. As argamassas que apresentaram menor viscosidade, e, em consequência, maior facilidade de espalhamento e menor resistência às deformações proporcionaram microscopicamente ao sistema de reparo melhor condição de zona de interface e também maiores resistências de aderência (apesar de AD-EVA ter seu ganho de resistência retardado pelo efeito colateral do polímero).

Figura 124 - Imagens capturadas por MEV da interface de ligação do sistema de reparo aumentadas 25 mil vezes.



Fonte: O autor (2016).

Figura 125 - Imagens capturadas por MEV da interface de ligação do sistema de reparo aumentadas em 1.000 vezes.



Fonte: O autor (2016).

4.6. ANÁLISE DE CUSTOS E APLICABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

4.6.1. Análise de custos

Pode-se, com base nos ensaios realizados neste trabalho, fazer uma análise de custos e comparar com o desempenho de cada argamassa estudada. É natural que as argamassas industrializadas possuam custo bastante superior às argamassas dosadas devido ao investimento de pesquisa e desenvolvimento tecnológico agregados a estes produtos, além dos custos de embalagem, logística, impostos, entre outros. Desta forma, esta análise ficará restrita às argamassas industrializadas.

Tomando como base o valor de mercado das argamassas na data de sua aquisição – excluindo descontos fornecidos pelo lojista – e ajustando estes valores pelo INCC correspondente ao período, obtém-se o custo unitário das argamassas conforme a Tabela 19. Nota-se que há evidente variação de preços em relação à média da tabela SINAPI apresentada na Tabela 1 (R\$ 3,67/kg), porém o custo médio do conjunto fica bastante próximo.

Tabela 19 - Custo atual estimado das argamassas industrializadas.

Argamassa	Aquisição	Custo por kg (R\$/kg)	INCC período (%)	Custo atual (R\$/kg) ¹⁴
AI-1	Out. 2015	4,00	6,47	4,26
AI-2	Abr. 2016	3,79	4,25	3,95
AI-3	Abr. 2016	2,40	4,25	2,50
AI-4	Jun. 2016	3,49	2,24	3,57
AI-5	Jun. 2016	3,79	2,24	3,87
Média	-	3,49	3,89	3,63

Fonte: O autor (2016).

Com os custos de cada argamassa devidamente equilibrados para a mesma época, pode-se avaliar o custo em comparação com o desempenho do produto no que se refere às resistências mecânica e de aderência aos 28 dias. A Tabela 20 apresenta esta comparação.

¹⁴ Preço estimado em fevereiro de 2017.

Tabela 20 - Custo por unidade de resistência mecânica e de aderência das argamassas industrializadas.

Argamassa	Desempenho mecânico (R\$/kg/MPa)		Aderência (R\$/kg/MPa)			
	Res. tração na flexão	Res. compressão	Tração direta	Tração na flexão	Cisalhamento direto	Cisalhamento oblíquo
AI-1	0,34	0,07	3,09	0,86	2,12	0,70
AI-2	0,41	0,07	2,65	0,58	1,83	0,54
AI-3	0,66	0,17	3,37	1,77	2,73	1,77
AI-4	0,42	0,08	2,86	1,07	2,09	0,66
AI-5	0,50	0,13	3,15	1,32	3,08	1,01

Fonte: O autor (2016).

A argamassa AI-2 possui a melhor relação custo-benefício do conjunto, tanto em resistência mecânica quanto em resistência de aderência. Em segundo lugar, vêm as argamassas AI-1 em resistência mecânica e AI-4 em aderência. Os ensaios mostraram que AI-1 é superior a AI-4 em desempenho, porém a relação custo-benefício de AI-4 em relação à resistência de aderência é superior. AI-3 e AI-5, que tiveram os piores desempenhos nos ensaios, também possuem relação custo-benefício desvantajosa. A argamassa AI-3, apesar do mau desempenho mecânico, possui a característica de menor retração, ao contrário de AI-5.

A análise de rendimento está apresentada na Tabela 21. Apesar do baixo desempenho mecânico, devido ao seu rendimento, o uso de AI-3 é fortemente viável na recuperação de elementos de estruturas sem responsabilidade estrutural, incluindo, por exemplo, grandes superfícies de reparo, por seu bom desempenho quanto à retração.

Tabela 21 - Custo por litro das argamassas industrializadas estudadas.

Argamassa	Rendimento (R\$/litro)
AI-1	8,15
AI-2	7,27
AI-3	4,32
AI-4	6,57
AI-5	6,49

Fonte: O autor (2016).

4.6.2. Aplicabilidade na construção civil

Conforme demonstram os ensaios de resistência mecânica, as argamassas industrializadas, mesmo sendo comercializadas sem clara definição de aplicabilidade em obra, obtiveram resultados bastante distintos nos diferentes tipos de ensaios.

Pode-se, então, resumir a aplicabilidade das argamassas em um quadro de avaliação final, levando em consideração os ensaios de caracterização e a análise de custos, conforme a necessidade de utilização para os casos de obra. O Quadro 17 apresenta esta avaliação incluindo as argamassas dosadas em laboratório. Com a ausência de análise de custos para estas argamassas, o comparativo não leva em conta este quesito, apenas as avaliações de desempenho obtidas nos ensaios.

A classificação negativa das argamassas AD-R e AD-SA para aderência foram baseadas no ensaio de MEV. O fato da impossibilidade de extração de pequenas partes do sistema de reparo desta argamassa demonstra uma condição de aderência pouco confiável apesar dos altos valores de resistência dos ensaios. A argamassa AD-R apresentou uma zona de transição relativamente porosa, portanto não adequada se levar-se em conta a proteção ao reparo. A argamassa AD-EVA pode ser utilizada para todas as situações, desde que com a liberação do reparo em idades avançadas.

Conclui-se, por fim, que as argamassas mais destacadas nos ensaios e considerações são, entre as industrializadas, AI-2, AI-1 e AI-4, respectivamente, e AD-EVA entre as dosadas em laboratório.

Quadro 17 - Aplicabilidade das argamassas industrializadas na construção civil.

Desempenho		AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5	AD-R	AD-EVA	AD-SA
Desempenho mecânico	Resistência à tração na flexão								
	Resistência à compressão								
	Módulo de elasticidade ¹⁵								
	Variação dimensional								
Desempenho de aderência	Aderência à tração direta								
	Aderência à tração na flexão								
	Aderência ao cisalhamento direto								
	Aderência ao cisalhamento oblíquo								
Rendimento									

Fonte: O autor (2016).

¹⁵ Avaliado levando em conta a teoria de distribuição de esforços de Mangat e O'Flaherty (2000).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a resistência de aderência de argamassas de reparo estrutural com o substrato de concreto através de ensaios de laboratório planejados para buscar atender as diferentes formas de solicitação mecânica às quais o sistema de reparo é submetido. Além disto, argamassas industrializadas foram caracterizadas físico-quimicamente com a proposta de compreender a influência da sua composição na resistência de aderência e também em outras grandezas. Ainda, o estudo propôs a dosagem de argamassas de reparo em laboratório, com traços baseados em trabalhos realizados ao longo do tempo, a fim de testar o efeito de elementos aplicados em argamassas de reparo isoladamente – no caso, polímero EVA e a sílica ativa.

Pode-se concluir que as características reológicas de argamassas de reparo em estado fresco influenciam na resistência de aderência com o substrato de concreto. Esta influência está relacionada com a viscosidade, que é uma grandeza escalar, e também com as tensões principais de escoamento e cisalhamento do fluido medidas pelo ensaio de *squeeze-flow* e calculadas através de ferramentas matemáticas. Argamassas de reparo que apresentaram menor viscosidade obtiveram melhor desempenho reológico e também maiores resistências de aderência em todas as modalidades de ensaio. O tempo de intervalo de aplicação das argamassas após misturadas influencia no aumento da viscosidade e, por isso, deve impactar na resistência de aderência.

Um exame de microscopia eletrônica de varredura mostrou, com ampliações de 1 mil e 25 mil vezes, a zona de transição de sistemas de reparo de seis (6) das oito argamassas estudadas neste trabalho. Este ensaio deixa clara a eficiência da viscosidade na construção de uma zona de transição adequada, notando-se que as argamassas AI-1, AI-2 e AD-EVA, argamassas com menor viscosidade no estado fresco, construíram uma transição regular e constante com o substrato, enquanto as zonas de transição de AI-4 e AI-5 apresentaram fissurações e irregularidades. A argamassa de referência (AD-R) gerou uma zona de transição bastante porosa e irregular, mostrando-se ineficiente para reparo e teve esta ineficiência refletida nos resultados dos ensaios.

A caracterização físico-química e de propriedades mecânicas de produtos industrializados mostrou que as argamassas de mercado, apesar de bastante distintas em comportamento, apresentam propriedades bastante similares entre as amostras, como mostram os ensaios de difratometria e fluorescência de raios-X. As particularidades mostradas nestes ensaios permitiram, em conjunto com a análise química por resíduo insolúvel, traçar uma estimativa de traço e tipo de cimento utilizado em cada argamassa industrializada.

Pode-se, dessa forma, assumir que o principal fator responsável pela distinção de comportamento entre argamassas industrializadas é a composição granulométrica, em especial a retenção de partículas na peneira #100. Amostras com alta retenção de grãos nesta faixa se apresentaram inferiores às aquelas com curvas granulométricas lineares (AI-1 e AI-2). Dentro da fração fina, a argamassa com partículas mais finas (AI-2) apresentou o melhor desempenho reológico e de aderência do grupo industrializado estudado, e, em geral, este padrão foi mantido para outras amostras, com exceção de AI-1, que apresentou desempenho melhor que AI-4 e possui partículas com diâmetros maiores, mostrando que há outros fatores além da granulometria envolvidos neste comportamento. A argamassa com alto teor de finos (AI-5) não obteve desempenho satisfatório no comportamento reológico tampouco na resistência de aderência e, além disso, obteve resultados de variação dimensional acima das outras amostras.

Quanto à utilização de adição polimérica de EVA e sílica ativa nas argamassas de reparo, pode-se concluir que o polímero é bastante eficiente no ganho de resistência mecânica de aderência e melhora significativamente as condições reológicas. Por outro lado, há forte atraso no ganho de resistência de argamassas com este tipo de adição pelo envolvimento dos grãos do aglomerante pelo filme polimérico. Este material é inviável para uso em sistemas de reparo que necessitem de rápida retirada de escoramentos sem a inclusão de aditivo acelerador de pega na sua formulação. A sílica ativa é uma adição que melhora significativamente a resistência mecânica e também a resistência de aderência. Porém, para este traço formulado, as condições reológicas ao estado fresco não foram significativamente melhoradas e, com isto, a aderência ficou prejudicada pela pouca extensão, comprovada pelo fato da impossibilidade de extração de pequenas amostras da argamassa AD-SA para ensaio de MEV.

A aderência de argamassas de reparo tem comportamento bastante particular para cada forma de solicitação mecânica, conforme apresentados os resultados dos ensaios. Isto corrobora a hipótese de que o esforço mais crítico para um sistema de reparo estrutural é a tração direta, ensaio que obteve as menores resistências de aderência, enquanto que o cisalhamento oblíquo,

ensaio realizado por compressão axial do corpo de prova, obteve as maiores resistências. Os ensaios de cisalhamento direto nos corpos de prova, para idades mais avançadas, mostram a eficiência das ligações químicas de aderência para este tipo de esforço, onde, no geral, as amostras apresentaram maior incidência de ruptura no substrato, que é um material teoricamente menos frágil que a zona de transição.

5.2.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudado por este trabalho, pode-se expandir a pesquisa nos seguintes itens:

- Estudar a influência das fibras no desempenho do reparo quanto à aderência e resistência mecânica e variação dimensional;
- Estudar a aceleração da pega para argamassas com polímeros na composição, permitindo melhor eficiência mecânica nas primeiras idades;
- Trabalhar em conjunto e com diferentes dosagens de sílica ativa e polímeros, na tentativa de definição de um traço adequado com estes dois materiais;
- Realizar ensaios em campo, com a influência do ambiente e da estrutura em funcionamento, para avaliação do desempenho da resistência de aderência;
- Comparar os resultados de viscosidade obtidos matematicamente como subproduto do ensaio de *squeeze-flow* com valores de viscosidade medidos através de reômetro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AFRIDI, M.U.K.; OYAMA, Y.; DEMURA, K.; IQPAL, M.Z. Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1715-1721, nov. 2003, ISSN 0008-8846.

AGGARWAL, L.K.; THAPLIYAL, P.C.; KARADE, S.R. Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 379-383, fev. 2007, ISSN 0950-0618.

AL-ALAWI, L.; BROOKS, J.J.; HASSAN, K.E. Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 1, p. 93-101, fev. 2001, ISSN 0958-9465.

ALLICHE, A.; MALLAT, A.; Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1587-1595, abr. 2011, ISSN 0950-0618.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and concrete terminology** - ACI 116R-00, 1973.

ANTUNES, R. P. N., JOHN, V., PILEGGI, R. G. Propriedades Reológicas de Argamassas Avaliada por Squeeze-Flow. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005.

ARNOLD, D.C.M.; KAZMIERCZAK, C.S. Influência da distribuição granulométrica e do agregado miúdo e do teor de fíler nas propriedades de argamassas com areia de britagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 8., 2009, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBTA, 2009.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 490**: Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. Philadelphia, 1997.

AUSTIN, S; ROBINS, P; PAN, Y. Tensile bond testing of concrete repairs. **Materials and Structures**. v.28, n.5, p. 249-259, jun. 1995, ISSN 1359-5997.

BARKOULA, N.M.; IOANNOU, C.; AGGELIS, D.G.; MATIKAS, T.E. Optimization of nano-silica's addition in cement mortars and assessment of the failure process using acoustic emission monitoring. **Construction and Building Materials**, v. 125, n. 1, p. 546-552, out. 2016, ISSN 0950-0618.

BARLUENGA, G.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. SBR latex modified mortar rheology and mechanical behavior. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 3, p. 527-535, mar. 2004, ISSN 0008-8846.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção – volume 1**. 5ª. Ed. São Paulo: LTC, 2000.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo, 1996. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARDOSO, F. A.; **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. São Paulo, 2009. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005. p. 121-143.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 748-753, set. 2009, ISSN 0008-8846.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento - Manual de utilização. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, v. 1, p. 1-29, 2010, ISSN 0103-9830.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 2009. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CATARINO, J.; GONÇALVES, A.; RIBEIRO, S. Reparação de estruturas de betão na normalização europeia. Em: Encontro nacional sobre conservação e reabilitação de estruturas. Lisboa, 2000. **Anais...** Lisboa, 2000. p. 105-113.

CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 40, n. 1, p. 869-874, mar. 2013, ISSN 0950-0618.

CINCOTTO, M.A.; PEREIRA, L.F.L.C. Determinação de cloretos em concreto de cimentos portland: influência do tipo de cimento. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, v. 1, p. 1-21, 2001, ISSN 0103-9830.

COSTA, E.B.C., **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. São Paulo, 2014. 206f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

COSTA, M.R.M., **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. São Paulo, 2006. 131f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

COSTA, M.R.M., CINCONOTTO, M.A., PILEGGI, R.G. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado e o seu comportamento reológico. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005. p. 382-394.

COSTA, M.R.M., PEREIRA, E., PILEGGI, R.G.; CINCOTTO, M.A. Study of the influential factors on the rheological behavior of adhesive mortar available in the market. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v.6, n.3, p. 399-413, 2013, ISSN 1983-4195.

CUSSON, D.; MAILVAGANAM, N. Durability of repair materials. **Concrete International: Design and Construction**, v. 18, n. 3, p. 34-38, mar. 1996.

DORIA, M.R.; SALES, A.T.C.; ANDRADE, N.F.A. Aderência aço-concreto e entre concretos de diferentes idades em recuperação de estruturas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.8, n.5, p. 604-624, out. 2015, ISSN 1983-4195.

EMMONS, P.H.; VAYSBURD, A.M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, p. 69-75, jul. 1995, ISSN 0950-0618.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strenght (EN 196)**. 1990.

FARZADNIA, N.; NOORVAND, H.; YASIN, A.M.; AZIZ, F.N.A. The effect of nano silica on short term drying shrinkage of POFA cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 95, n. 1, p. 636-646, out. 2015, ISSN 0950-0618.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A.T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7ª. Ed. São Paulo: LTC, 2009.

GEMERT, D.V.; CZARNECKI, L.; MAULTZSCH, M.; SCHORN, H.; BEELDENS, A.; ŁUKOWSKI, P.; KNAPEN, E. Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds. A report from 11th ICPIG Congress in Berlin, 2004. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 9-10, p. 926-933, out-nov. 2005, ISSN 0958-9465.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D.; Rheological Lab Testing of Building Formulations. In. CONCHEM CONFERENCE, 1994, Düsseldorf. **Anais eletrônicos...** Düsseldorf: Construction Chemistry, 1994. Disponível em: <<http://www.baustoffchemie.de/en/rheology>>. Acesso em: 11 abr. 2015.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª. Ed. São Paulo: Pini, 1992.

INTERNATIONAL. STANDARD. **ISO 13320**: Particle size analysis — Laser diffraction methods. 2009.

KHALEEL, O. R.; RAZAK, H. A. The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 36, n. 1, p. 20-26, nov. 2012, ISSN 0950-0618.

KINLOCH, A. J. The science of adhesion. **Journal of Materials Science**, v. 15, n. 9, p. 2141–2166, set. 1980, ISSN 0022-2461.

KORMANN, A. C. M.; PORTELLA, K. F.; PEREIRA, P. N.; SANTOS, R. P. Study of the performance of four repairing material systems for hydraulic structures of concrete dams. **Cerâmica**, v.49, n.309, p. 48-54, 2003, ISSN 0366-6913.

KORMANN, A. C. M.; **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. Curitiba. 2002. 213 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

LENART, M. Assessment of mortar shrinkage in aspect of organic and inorganic modifiers use. In. 7th SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE MATERIAL PROBLEMS IN CIVIL ENGINEERING. Junho, 2015, Cracóvia. **Anais...** Cracóvia: Procedia Engineering, 2015.

MANGAT, P.S.; O'FLAHERTY, F.J. Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 1, p. 125-136, jan. 2000, ISSN 0008-8846.

MARQUES, S.F.; RIBEIRO, R.A., SILVA, L.M.; FERREIRA, V.M.; LABRINCHA, J.A. Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1894-1902, out. 2006, ISSN 0008-8846.

MATTANA, A. J; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, N. G.; COSTA, M. R. M. M.; Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimentos. **Revista Ambiente Construído**, v. 12, n.4, 2012. ISSN 1678-8621

MEDEIROS, M. H. F. **Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras por Carbonatação: Comparação de Argamassas de Reparo quanto a Proteção do Aço**. São Paulo. 2002 193 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P; SELMO, S. Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2527-2533, jul. 2009, ISSN 0950-0618.

MESSAN, A.; IENNY, P.; NECTOUX, D. Free and restrained early-age shrinkage of mortar: Influence of glass fiber, cellulose ether and EVA (ethylene-vinyl acetate). **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 3, p. 402-410, mar. 2011, ISSN 0958-9465.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concrete: Microstructure, properties and materials**. 3ª ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2006. 684p.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Rheological behavior of fresh cement paste as measured by squeeze flow. **Journal of Materials Science**, v. 29, n. 5, p. 1374-1381, mar. 1994, ISSN 0022-2461.

MOBILI, A.; BELL, A.; GIOSUÈ, C.; BELLEZZE, T.; TITTARELLI, F. Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class. **Cement and Concrete Research**, v. 88, n. 1, p. 198-210, out. 2016, ISSN 0008-8846.

MORENO JUNIOR, R; SELMO, S. M. S. Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto. **Boletim técnico da Escola Politecnica da Universidade de São Paulo**. São Paulo, 2007.

MORGAN, D. R. Compatibility of concrete repair materials and systems. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, p. 57-67, fev. 1996, ISSN 0950-0618.

OHAMA, Y. **Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars**. Nova Jersey: Noyes Publications, 1995.

OLIVEIRA, J. **Estudo das propriedades de argamassas colantes submetidas à saturação e secagem**. Florianópolis, 2004. 180 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T.R.; GRANDO, F.; HELENE, P. Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto. In. 56º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Outubro, 2014, Natal. **Anais...** Natal: Ibracon, 2014, ISSN 2175-8182.

PEREIRA, E. **Estudo da influência das propriedades de argamassas colantes na resistência de aderência de revestimentos cerâmicos aplicados no assentamento de piso sobre piso**. Curitiba, 2012. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná.

QUARCIONI, V.A. **Reconstituição de traço de argamassas: atualização do método IPT**. São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

QUARCIONI, V.A.; CINCOTTO, M. A.; MATAVELLI, M.A.; CHOTOLI, F.F. Reconstituição de traço de argamassas: aplicações e limitações da análise química. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: SBTA, 1997.

RAMLI, M.; TABASSI, A.A. Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions: A correlational study that includes pore distributions, water absorption and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 561-570, mar. 2012, ISSN 0950-0618.

RAMLI, M.; TABASSI, A.A.; HOE, K.W. Porosity, pore structure and water absorption of polymer-modified mortars: An experimental study under different curing conditions. **Composites Part B: Engineering**, v. 55, n. 1, p. 221-233, dez. 2013, ISSN 1359-8368.

RASHID, K; UEDA, T; ZHANG, D; MIYAGUCHI, K; HIROSHI, N. Experimental and analytical investigations on the behavior of interface between concrete and polymer cement mortar under hygrothermal conditions. **Construction and Building Materials**, v. 94, n. 1, p. 414-425, set. 2015, ISSN 0950-0618.

RED REHABILITAR. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. 1ª ed. São Paulo: Cyted, 2003. 718p. ISBN 85-903707-1-2.

ROMANO, R.C.O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. São Paulo, 2013. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ROMANO, R.C.O.; TORRES, D.R.; PILEGGI, R.G. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. **Construction and Building Materials**, v. 82, n. 1, p. 219-226, mai. 2015, ISSN 0950-0618.

SANTANA, L.A. **Estudo da aderência entre concretos de diferentes idades**. Campos dos Goytacazes, 2004. 103 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense.

SCHUEREMANS, L.; CIZER, Ö.; JANSSENS, E.; SERRÉ, G. VAN BALEN, K. Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 12, p. 4338-4350, dez. 2011, ISSN 0950-0618.

SIDERIS, K. K.; MANITA, P.; SIDERIS, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 623-631, ago. 2004, ISSN 0958-9465.

SILVA, J. A. F. **Argamassas de reparação**. Porto, 2008. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL (SINAPI) – Relatório de Insumos e Composições – JAN/17. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-pr/SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_PR_012017_Desonerado.zip>. Acesso em 23 fev.2017.

SITTER, W. R. Costs for service life optimization. In. DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES. Maio, 1984, Copenhagen. **Anais...** Copenhagen: CEB-RILEM, 1984.

SOUSA, J. A. M. **Inspecção e reabilitação de estruturas segundo a NP EN 1504 – Caso de obra**. Porto, 2011. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SOUZA, V.C., RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. PINI, São Paulo, 1998.

STOLZ, C. M. **Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SU, Z. **Microstructure of Polymer Cement Concrete**. Delft: 1995, 174p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil e Geociências da Universidade Técnica de Delft.

SZEMEREY-KISS, B.; TÖRÖK, Á.; SIEGESMUND, S. The influence of binder/aggregate ratio on the pore properties and strength of repair mortars. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, n. 4, p. 1439-1449, 2013.

TILLY, G.; JACOBS, J. **Concrete Repairs: Performance in Service and Current Practice**. ConRepNet Project Report, IHS BRE Press, Watford, 2007.

UKRAINCZYK, N.; ROGINA, A. Styrene-butadiene latex modified calcium aluminate cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 41, n. 1, p. 16-23, ago. 2013, ISSN 0958-9465.

YUNPENG, L.; FAZHOU, W.; MUYU, L; SHUGUANG, H; A microstructural approach to adherence mechanism of cement and asphalt mortar (CA mortar) to repair materials. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 125-131, set. 2014, ISSN 0950-0618.

ZHOU, J.; YE, G.; BREUGEL, K.V. Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 765-772, jun. 2016, ISSN 0950-0618.

APÊNDICES

Apêndice A – Caracterização do concreto de substrato utilizado para os ensaios de resistência de aderência.

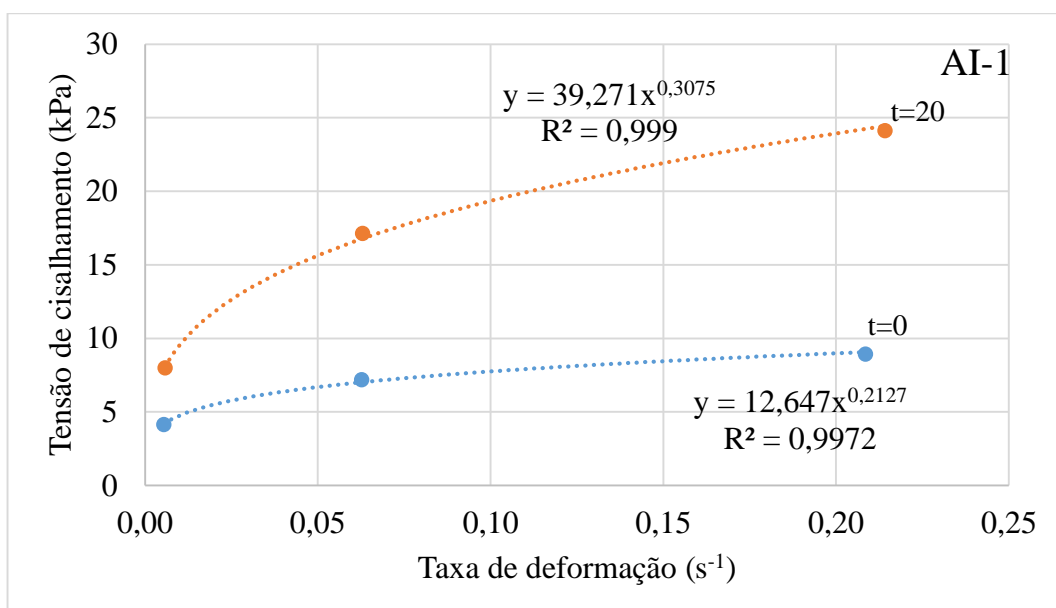
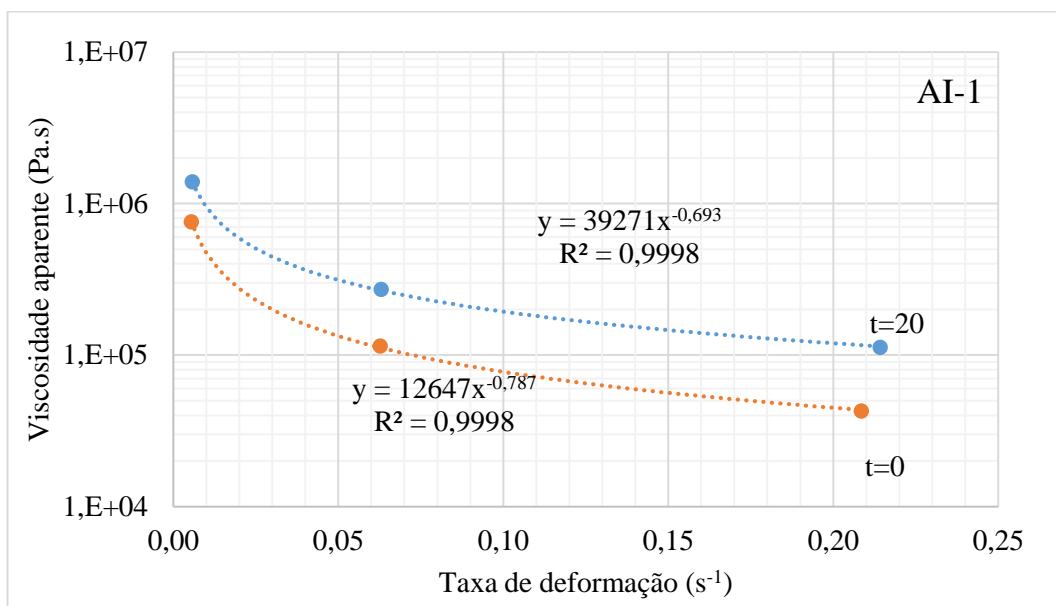
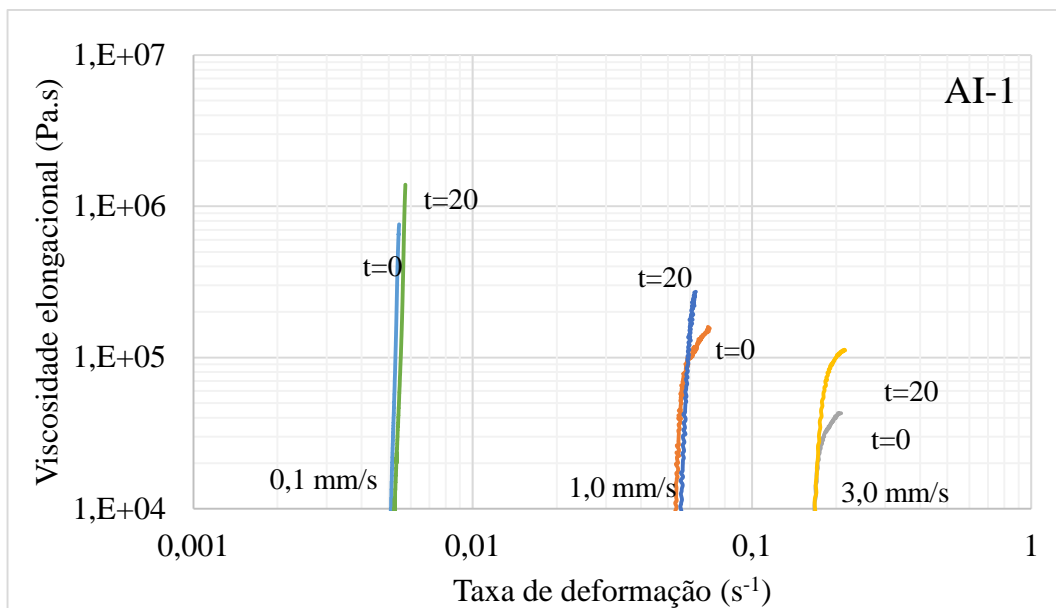
O concreto utilizado como substrato foi dosado com traço em massa de 1:2,17:2,94, com relação água/cimento de 0,6 e provável resistência à compressão característica (f_{ck}) de 25 MPa ($S_d = 4,5\text{MPa}$).

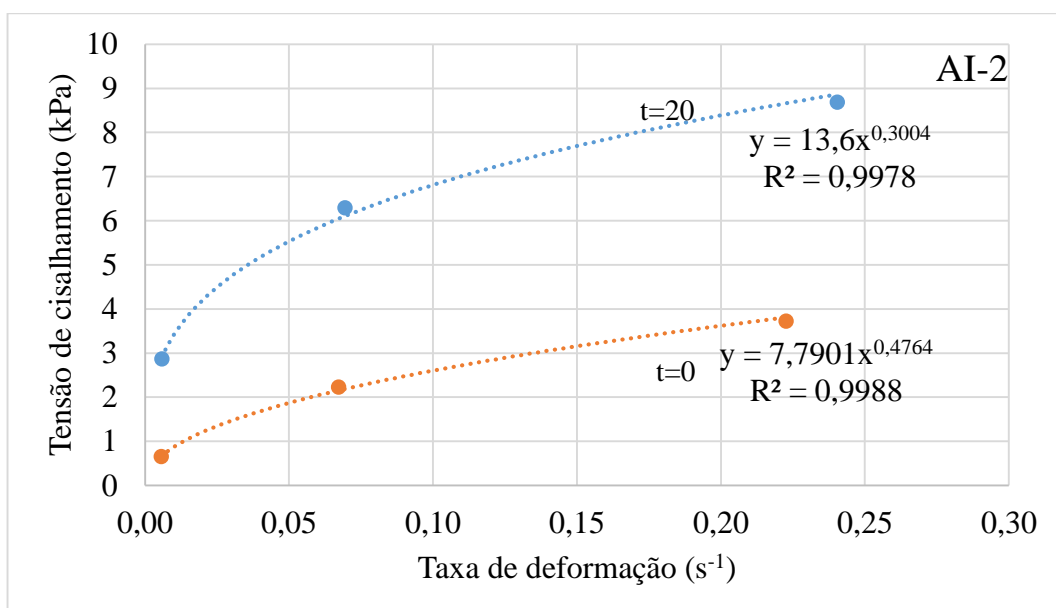
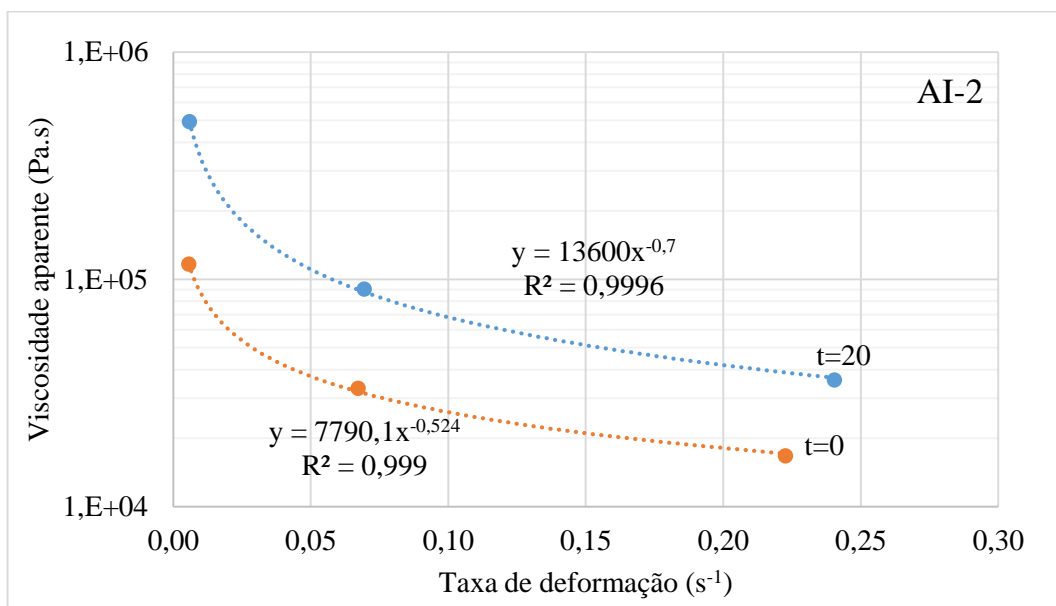
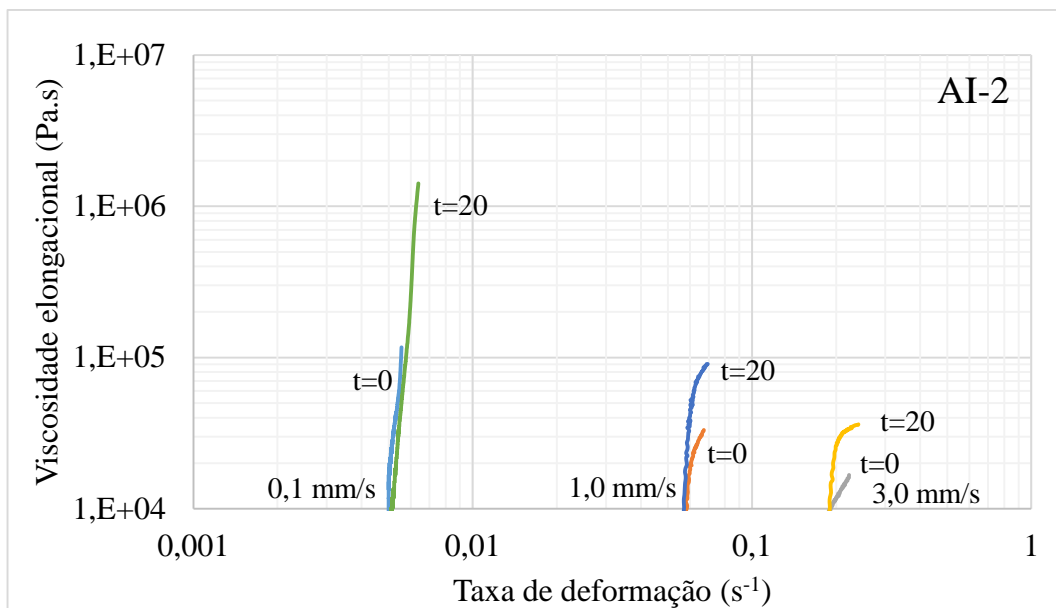
Ensaio de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico foram realizados aos 28 dias com cinco (5) corpos de prova prismáticos de 40x40x160 milímetros, moldados para servir como substrato para os ensaios de resistência de aderência à tração na flexão e ao cisalhamento direto, de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005) e NBR 15630 (ABNT, 2009). Os resultados estão apresentados na Tabela 22.

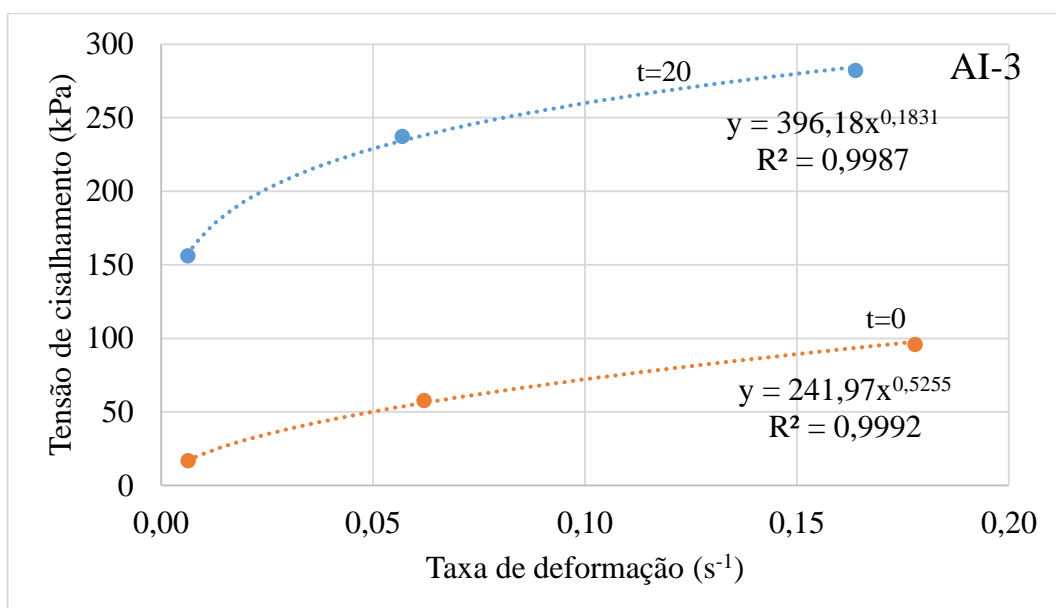
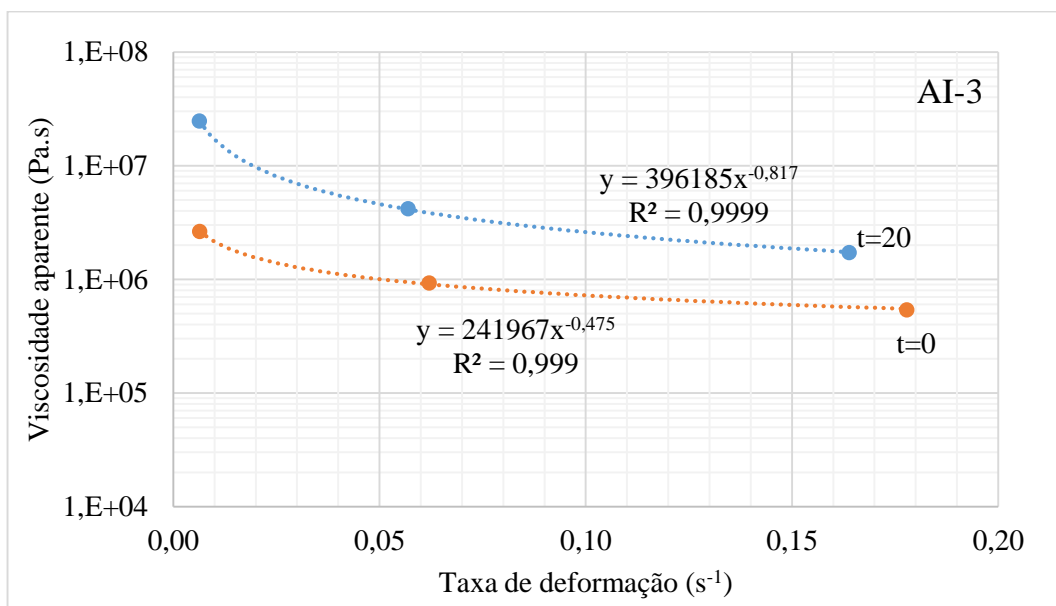
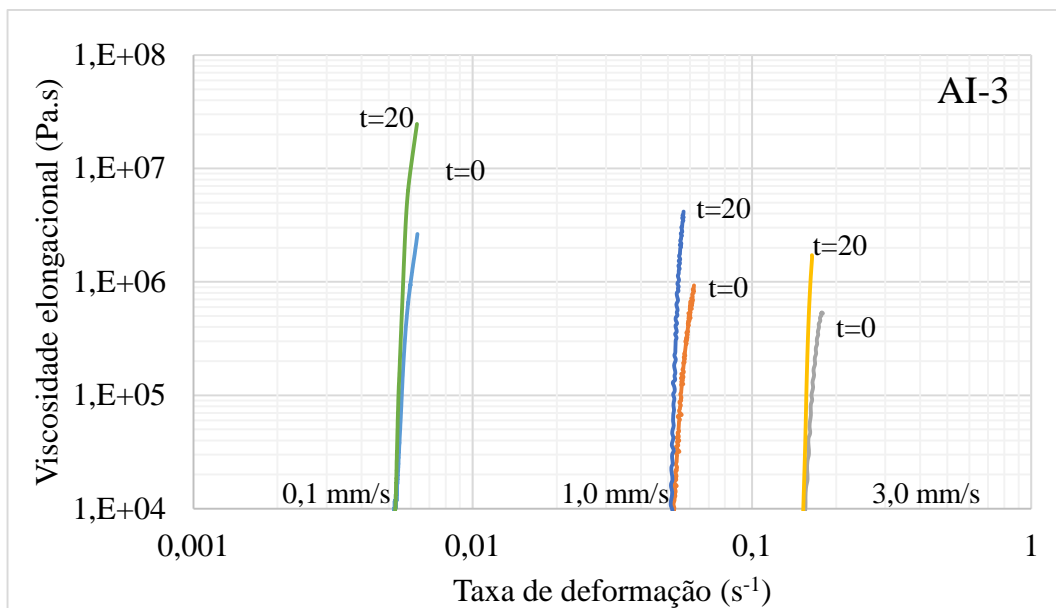
Tabela 22 - Caracterização do concreto utilizado como substrato para os ensaios de resistência de aderência.

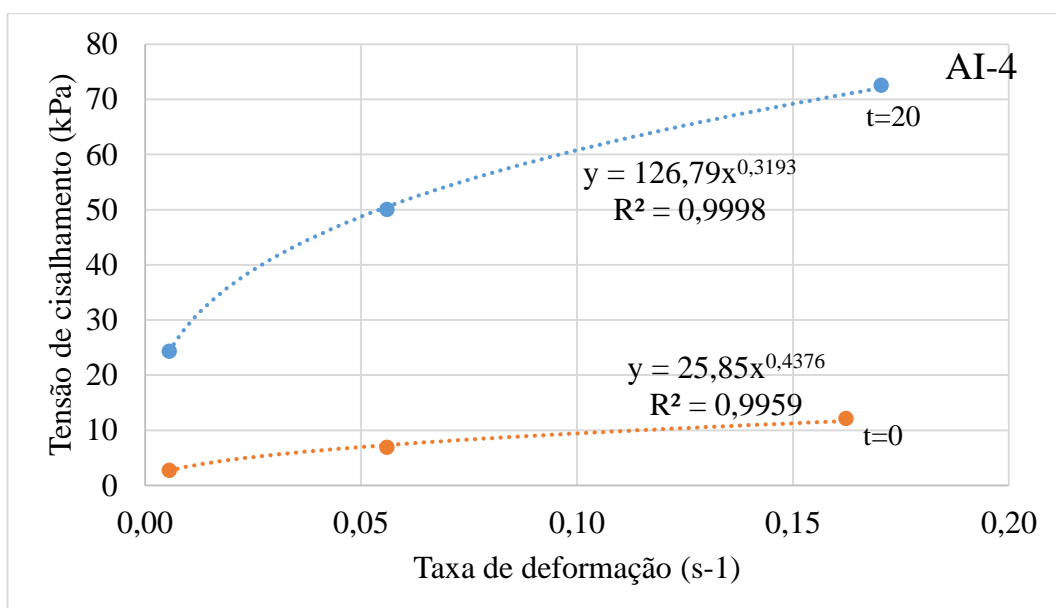
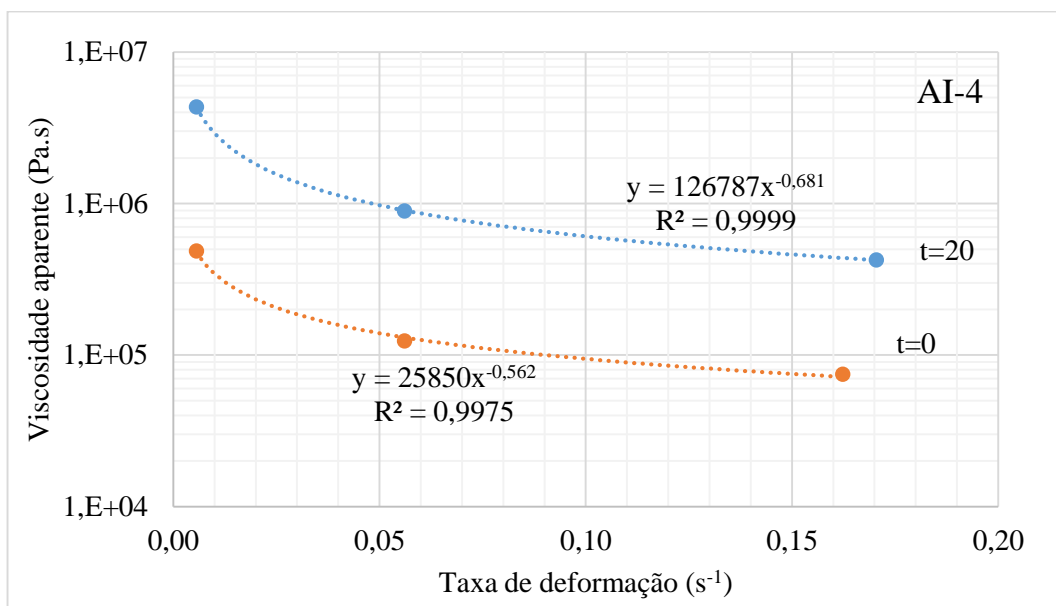
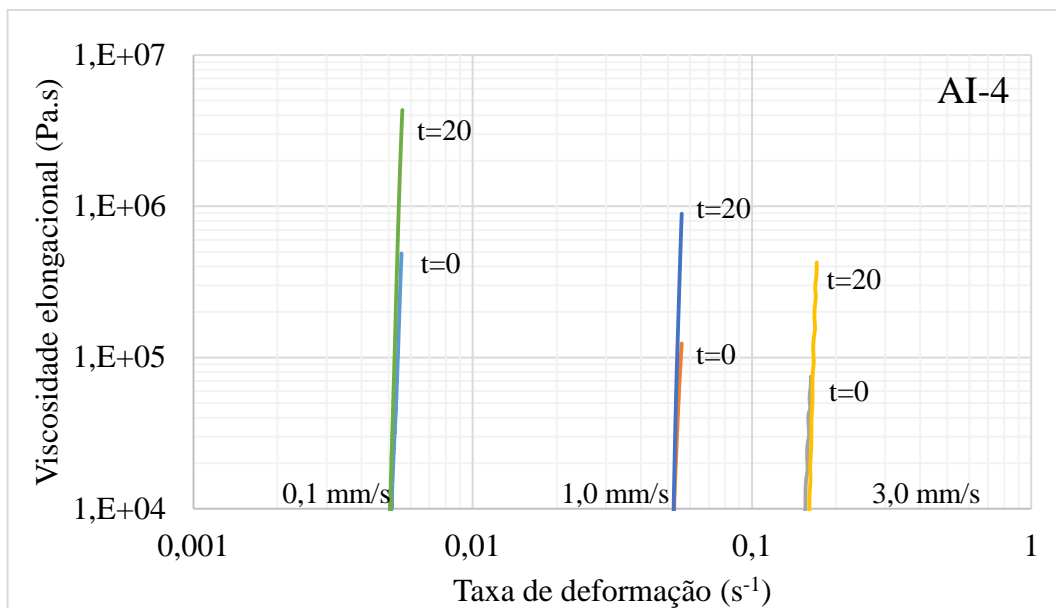
Corpo de prova	Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
CP-1	5,61	36,77 34,63	32,14
CP-2	6,47	36,92 38,70	34,16
CP-3	5,22	34,12 34,99	30,95
CP-4	7,07	39,35 40,11	31,72
CP-5	6,55	37,42 39,28	31,12
Média	6,18	37,23	32,02
Desvio padrão	0,75	2,02	1,15

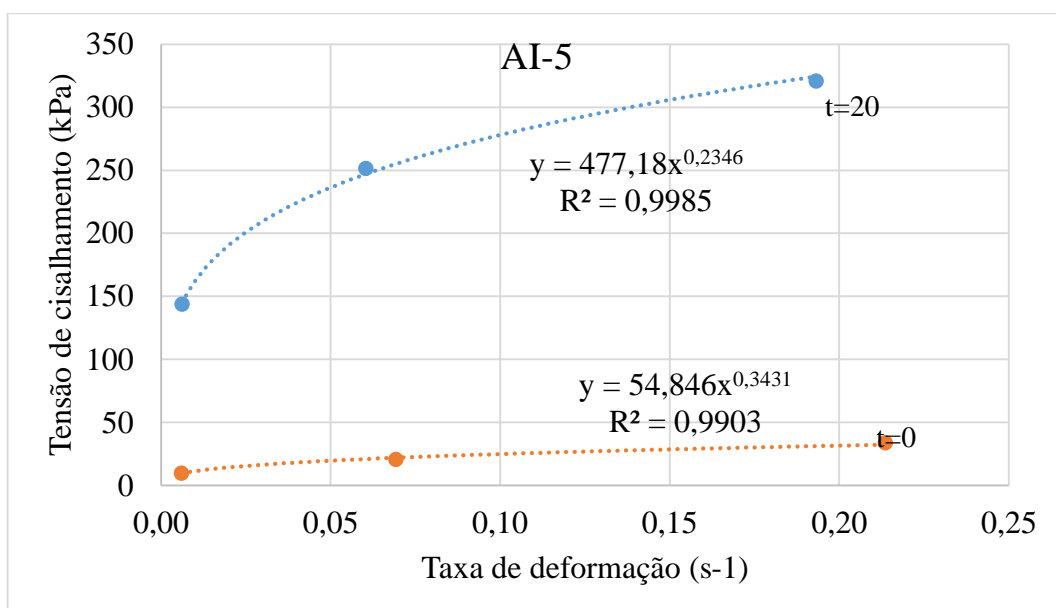
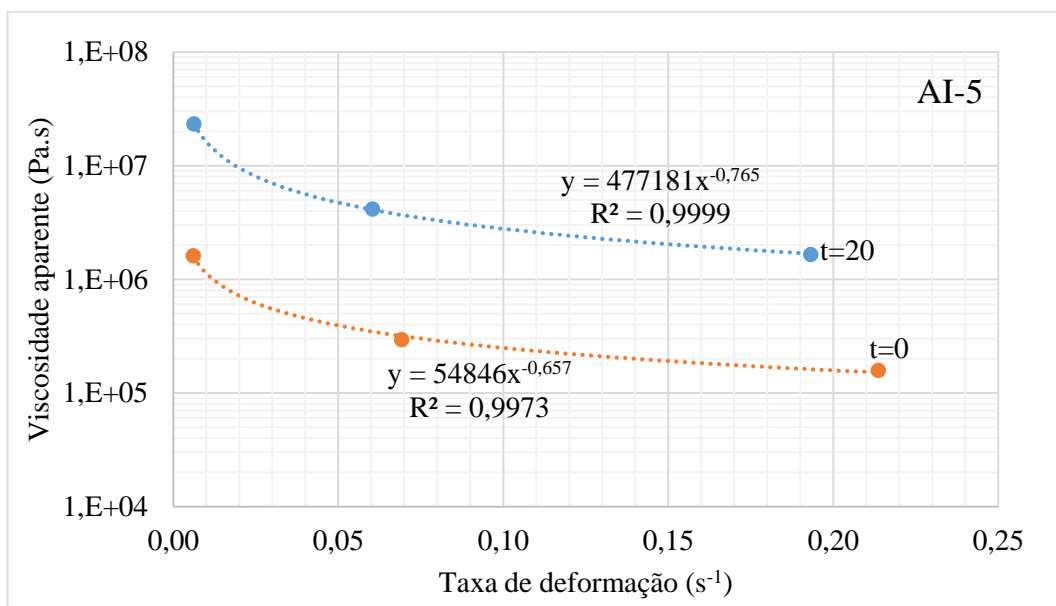
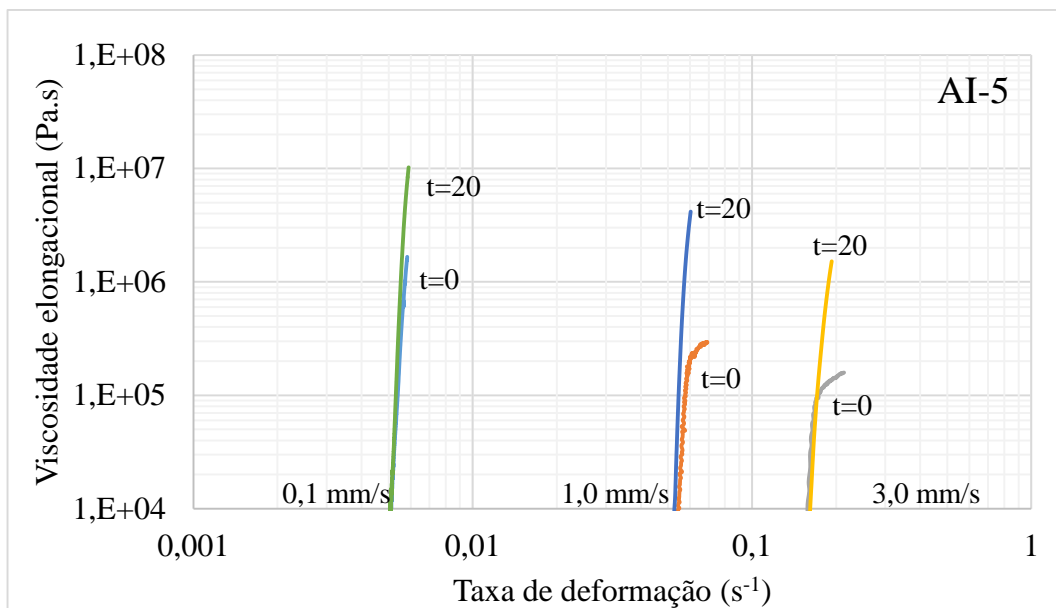
Apêndice B – Curvas de viscosidade e tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação obtidas através do ensaio de *squeeze-flow*.

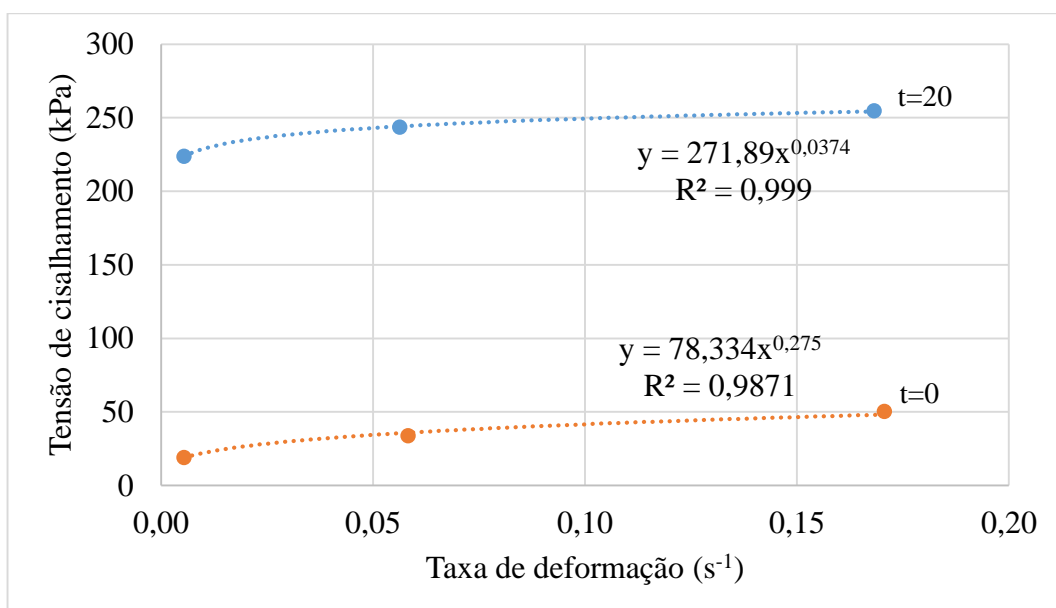
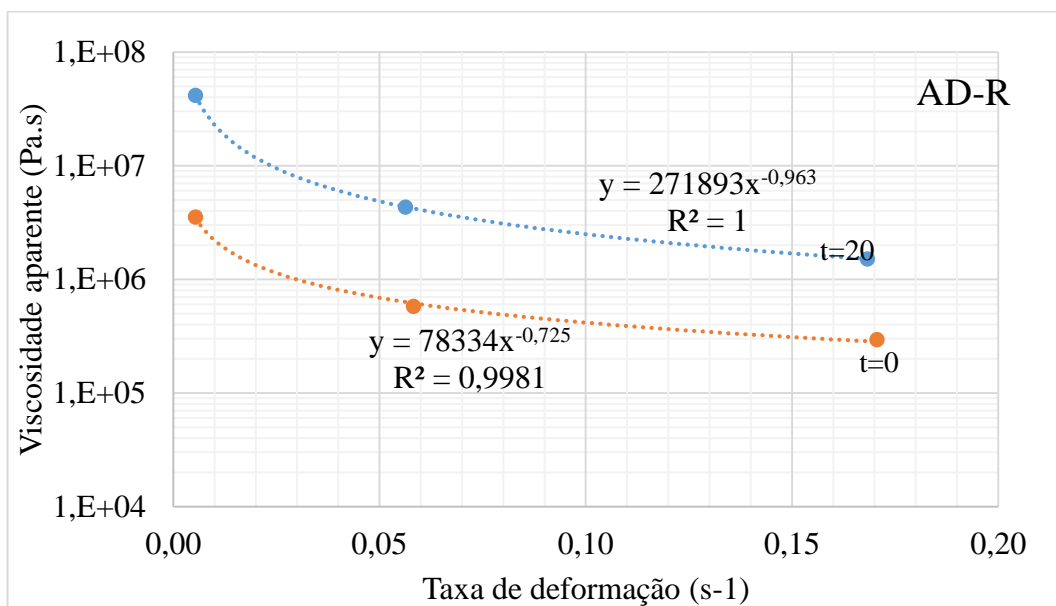
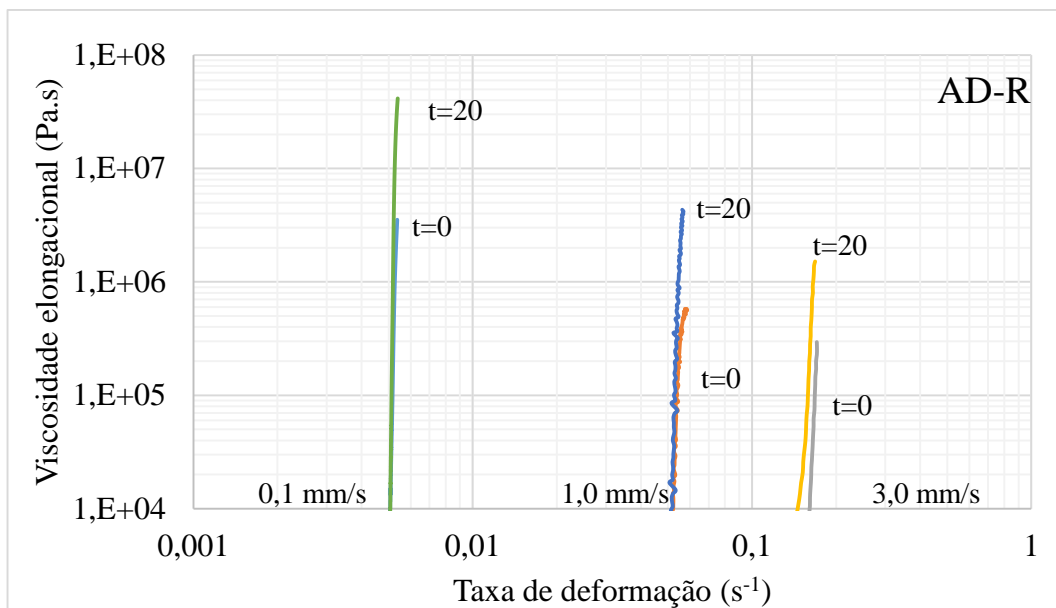


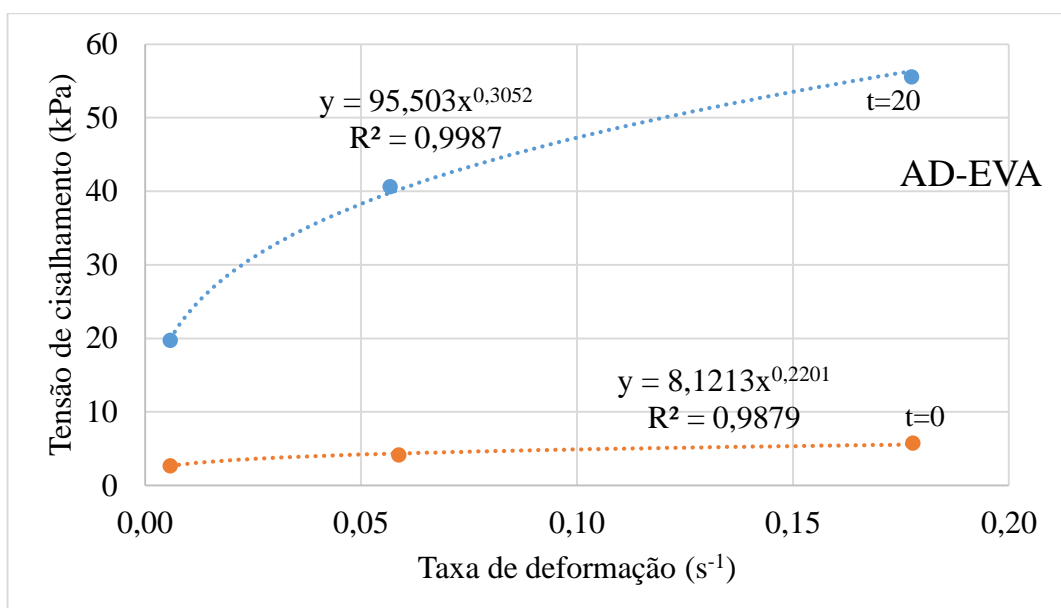
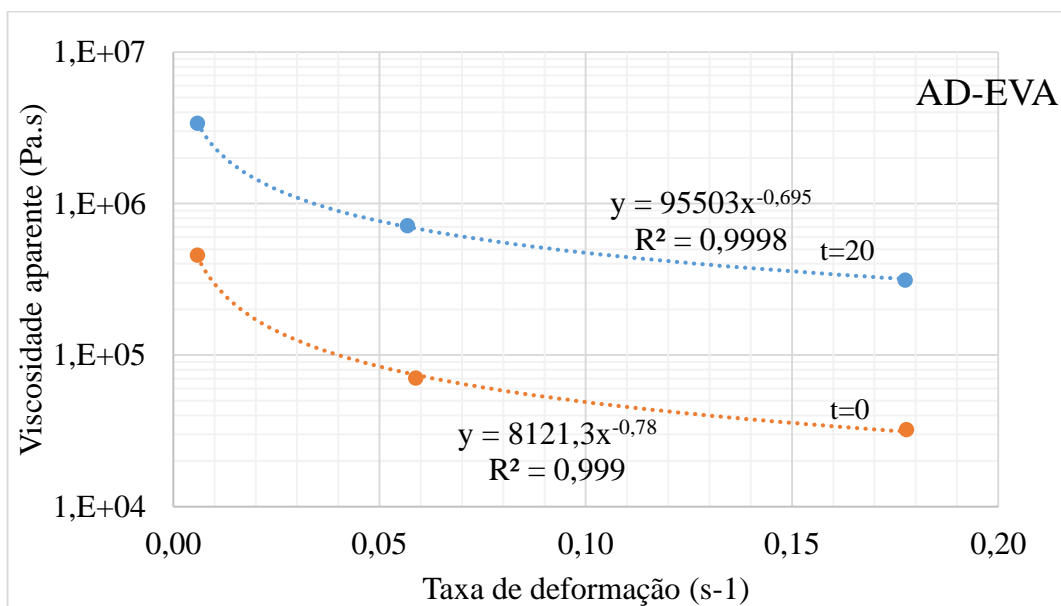
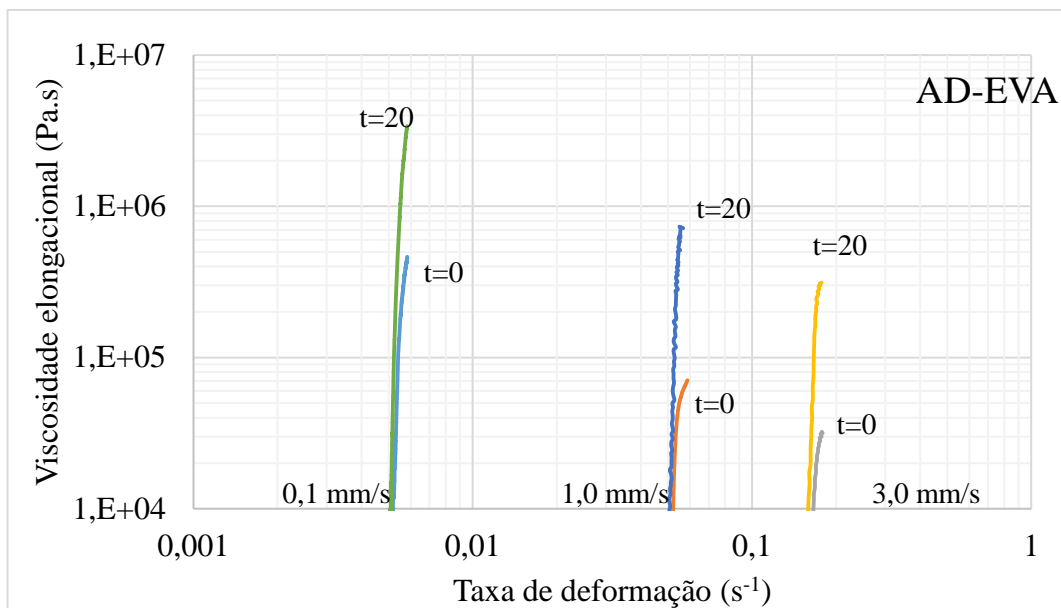


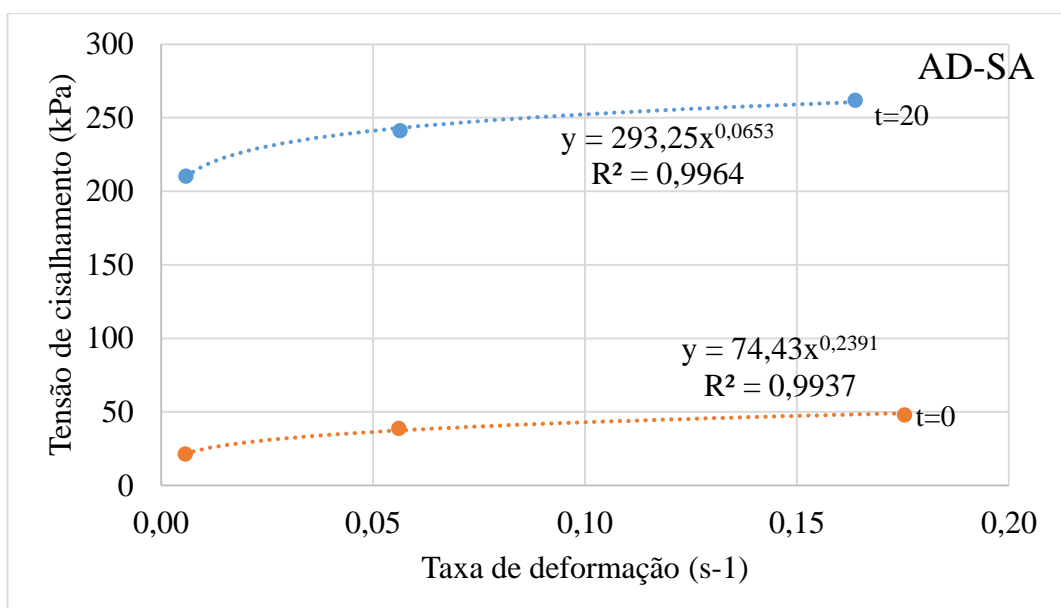
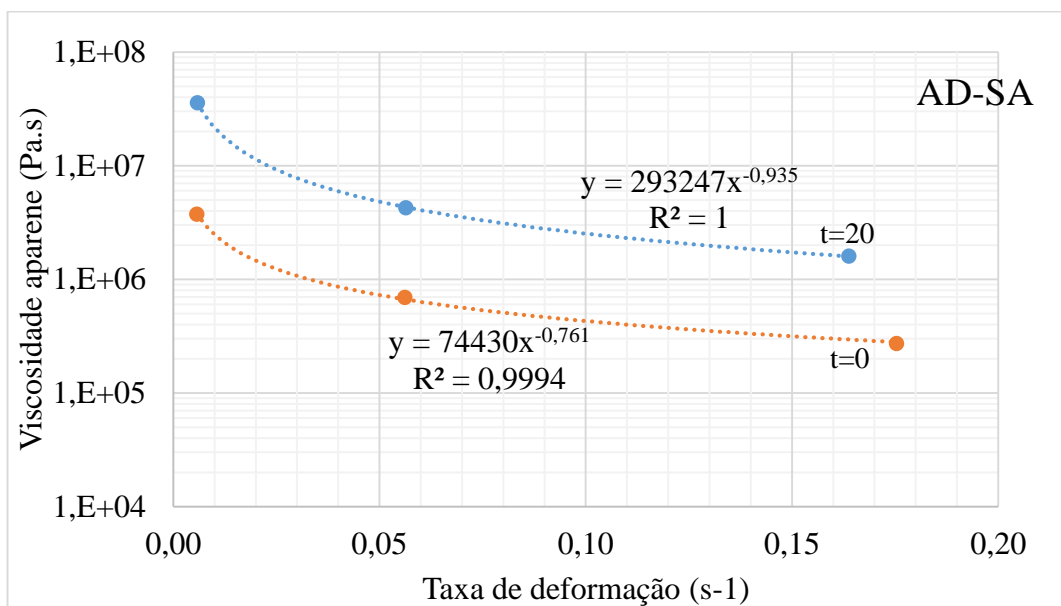
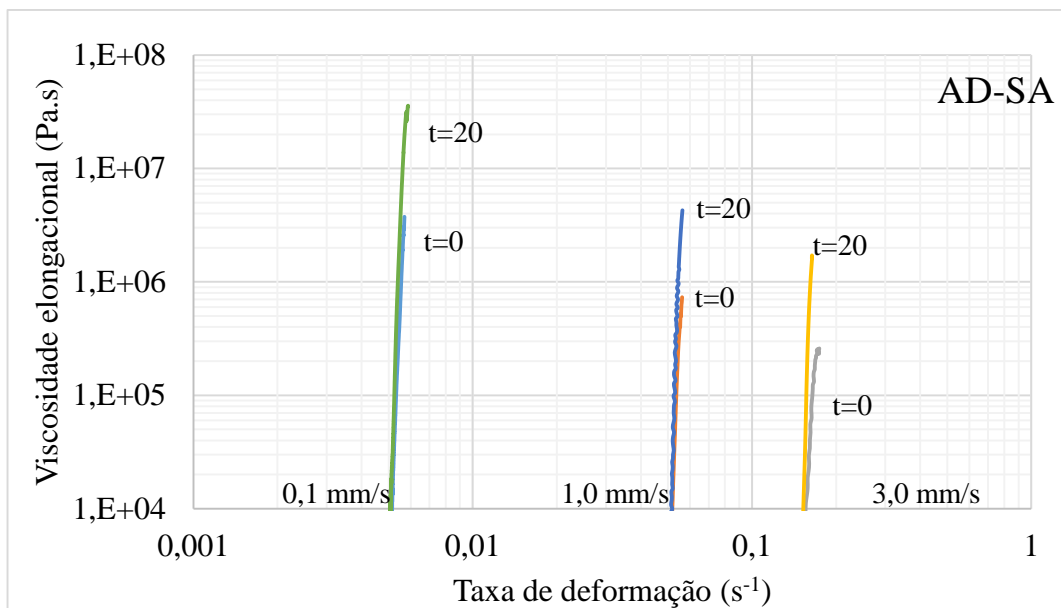












Apêndice C – Análises estatísticas de variância (ANOVA) dos resultados obtidos nos ensaios.

a. Resistência de aderência com até 2 dias

a1) CÁLCULOS PRELIMINARES

TC	90,1457
SQA	41,86
SQB	14,48
SQAB	33,72
SQT	93,09
SQR	3,02

a2) TABELA ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F Tab
Tipo de ensaio	41,86	3	14,0	296,1	2,7
Tipo de argamassa	14,48	7	2,1	43,9	2,2
Interação	33,72	21	1,6	34,1	1,7
Dentro grupo	3,02	64	0,0		
TOTAL	93,09	95			

b. Resistência de aderência com 7 dias

b1) CÁLCULOS PRELIMINARES

TC	395,976
SQA	392,64
SQB	115,15
SQAB	-223,52
SQT	298,55
SQR	14,28

b2) TABELA ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F Tab
Tipo de ensaio	392,64	3	130,9	586,5	2,7
Tipo de argamassa	115,15	7	16,5	73,7	2,2
Interação	-223,52	21	-10,6	-47,7	1,7
Dentro grupo	14,28	64	0,2		
TOTAL	298,55	95			

c. Resistência de aderência com 28 dias

c1) CÁLCULOS PRELIMINARES

TC	661,014
SQA	655,84
SQB	164,76
SQAB	-501,35
SQT	328,84
SQR	9,59

c2) TABELA ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F Tab
Tipo de argamassa	655,84	7	93,7	625,2	2,2
Tipo de ensaio	164,76	3	54,9	366,5	2,7
Interação	-501,35	21	-23,9	-159,3	1,7
Dentro grupo	9,59	64	0,1		
TOTAL	328,84	95			